KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

# TÜRKİYE ORTA GERİLİM ENERJİ DAĞITIM SİSTEMİNDE TEK FAZLI GERİLİM REGÜLATÖRÜ UYGULAMASININ İNCELENMESİ

CEM KIZILKAYA

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

# TÜRKİYE ORTA GERİLİM ENERJİ DAĞITIM SİSTEMİNDE TEK FAZLI GERİLİM REGÜLATÖRÜ UYGULAMASININ İNCELENMESİ

CEM KIZILKAYA

| | | |
|---|---|---|
| Doç.Dr. Bora ALBOYACI<br>Danışman, | Kocaeli Üniversitesi | ..... |
| Doç.Dr. Nuran YÖRÜKEREN<br>Jüri Üyesi, | Kocaeli Üniversitesi | ..... |
| Prof. Dr. Mehmet BAYRAK<br>Jüri Üyesi, | Sakarya Üniversitesi | ..... |

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.11.2019

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, ülkemizdeki elektrik dağıtım sisteminde Ar-Ge projesi olarak ilk kez uygulaması yapılan, OG seviyede kullanılan otomatik gerilim regülatörü projesi anlatılmıştır.

Tez çalışmalarımda her türlü desteği veren ve tamamlanmasına katkı sağlayan sayın danışmanım Doç. Dr. Bora ALBOYACI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayata geçen projemiz sonucunda edinilen bilgi ve birikimi kullanıma sunan, ayrıca akademik eğitime verdiği desteklerden dolayı UEDAŞ Ar-Ge Direktörü Sn. Mutlu DALKAÇ'a teşekkür ederim.

Ar-Ge projesinin paydaş firması olan ENDOKS'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tezimde anlatımını yaptığımız projenin saha kurulumları ile scada üzerinden ölçme ve izleme faaliyetlerinde yardımları bulunan Sn. Erkan YAŞAR ve Sn. Barış USLU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez hazırlama sürecinde kıymetli vakitlerinden feragat eden eşim Bedriye KIZILKAYA ve kızım Betül KIZILKAYA'ya ve hayatta her türlü desteğini bizden esirgemeyen değerli ailem Fahrettin-Mümine KIZILKAYA'ya şükranlarımı sunarım.

Kasım-2019 Cem KIZILKAYA

**İÇİNDEKİLER**

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... i
İÇİNDEKİLER ..... ii
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... iv
TABLOLAR DİZİNİ ..... vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... vii
ÖZET ..... ix
ABSTRACT ..... x
GİRİŞ ..... 1
1. GENEL BİLGİLER ..... 3
1.1. Gerilim Regülasyonu Literatür Taraması ..... 4
2. GÜÇ KALİTESİ ..... 7
2.1. Güç Kalitesi Parametreleri ..... 7
2.1.1. Frekans ..... 8
2.1.2. Etkin gerilimi değeri ..... 8
2.1.3. Gerilim olayları ..... 9
2.1.3.1. Gerilim düşmesi (Sag) ..... 10
2.1.3.2. Gerilim yükselmesi (Swell) ..... 10
2.1.3.3. Transient ..... 10
2.1.3.4. Kesinti (Interruption) ..... 11
2.1.4. Gerilim dengesizliği ..... 11
2.1.5. Fliker ..... 12
2.1.6. Harmonik gerilimler ..... 13
2.2. Ulusal OG Seviyede Sınır Değerler ..... 14
2.2.1. Tedarik sürekliliği değerleri ..... 14
2.2.2. Teknik kalite değerleri ..... 16
3. GERİLİM REGÜLASYONU ..... 19
3.1. Gerilim Düşümü ..... 19
3.2. Gerilim Aşımı ..... 22
3.3. Gerilim Regülasyonu Çözümleri ..... 22
3.3.1. Boşta kademe değiştirici ..... 23
3.3.2. Yükte kademe değiştirici (OLTC) ..... 23
3.3.3. Şönt kapasitör ve reaktör ..... 25
3.3.4. Oto trafo ..... 26
3.3.5. İndüksiyon regülatör ..... 27
3.3.6. Otomatik gerilim regülatörü (Step voltage regulator) ..... 28
3.4. Gerilim Dengesizliği Çözümleri ..... 28
4. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖRLERİ (SVR) ..... 29
4.1. Genel Yapısı ..... 31
4.1.1. İç yapısı ..... 33
4.1.2. Reaktör ..... 37
4.1.3. Kontrol paneli ..... 38
4.1.4. Kademe anahtarı ve göstergesi ..... 38
4.2. Çalışma Prensibi ..... 42
4.3. Regülatör Bağlantı Türleri ..... 46
4.3.1. Tek fazlı bağlantı ..... 46
4.3.2. Yıldız bağlantı ..... 47
4.3.3. Kapalı üçgen bağlantı ..... 49

4.3.4. Açık üçgen bağlantı....51
4.4. Kontrol Sistemi....53
4.4.1. Düz/Ters çalışma....55
4.4.2. Çift yönlü çalışma....55
4.4.3. Reaktife bağlı çift yönlü çalışma....55
4.4.4. Ters durumda nötr veya konum koruma....55
4.4.5. Kojenerasyon çalışma....55
4.5. Devreye Alma....56
5. TUZLA KÖK OG ŞEBEKE UYGULAMASI....57
5.1. Fider Tespit Çalışmaları....57
5.2. Şebeke Analizleri....59
5.2.1. 1. senaryo %100 yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum....61
5.2.2. 2. senaryo %100 yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum....62
5.2.3. 3. senaryo %50 yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum....63
5.2.4. 4. senaryo %50 yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum....64
5.2.5. 5. senaryo %0 yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum....65
5.2.6. 6. senaryo %0 yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum....66
5.2.7. 7. senaryo %120 yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum....67
5.2.8. 8. senaryo %120 yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum....68
5.3. Şebeke İyileştirmeleri....69
5.4. Gerilim Regülatörünün Yerinin Belirlenmesi Çalışması....71
5.4.1. Yük akışı....72
5.4.2. Kritik bölgelerin belirlenmesi....72
5.4.3. En uygun konumun belirlenmesi için fonksiyon uygulanması....72
5.4.4. UEDAŞ bölgesinde regülatör yer tespiti....73
5.5. Regülatör Seçimi....76
5.6. Regülatör Üreticileri....77
5.7. Montaj Çalışmaları....79
5.8. Sağladığı Faydalar Gerilim Profiline ve Şebeke Kayıplarına Etkisi....80
5.9. Ekonomik Değerlendirme....83
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....85
KAYNAKLAR....88
EKLER....92
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER....99
ÖZGEÇMİŞ....100

## ŞEKİLLER DİZİNİ


Şekil 2.1. Frekans illüstrasyon ..... 8
Şekil 2.2. Gerilim düşümü ..... 9
Şekil 2.3. Gerilim olayları görseli ..... 9
Şekil 2.4. Gerilim düşmesi ..... 10
Şekil 2.5. Gerilim yükselmesi ..... 10
Şekil 2.6. Gerilim kesintisi ..... 11
Şekil 2.7. Gerilim dengesizliği ..... 11
Şekil 3.1. Basit hat modeli ..... 20
Şekil 3.2. Hat sonu gerilimi fazör diyagramı ..... 20
Şekil 3.3. Gerilim düşümü grafiği ..... 23
Şekil 3.4. a) Yükte kademe değiştirici ve b) prensip şeması ..... 24
Şekil 3.5. Sabit ayarlanmış gerilim grafiği ..... 24
Şekil 3.6. OG a) kapasitör ve b) reaktör ..... 25
Şekil 3.7. Optimum kapasitör yerleştirme ..... 25
Şekil 3.8. Oto trafo sargıları ..... 26
Şekil 3.9. İndüksiyon regülatör a) prensip şeması ve b) fazörü ..... 27
Şekil 3.10. İndüksiyon regülatör ..... 27
Şekil 3.11. Booster trafo yapısı ..... 28
Şekil 4.1. Şebeke genel yapısı ..... 29
Şekil 4.2. SVR ile gerilim regülasyonu ..... 30
Şekil 4.3. Regülatör bankı ..... 30
Şekil 4.4. EATON (Cooper) tek fazlı gerilim regülatörü yapısı ..... 31
Şekil 4.5. EATON (Cooper) VR 32 gerilim regülatörü ve iç yapısı ..... 34
Şekil 4.6. Oto trafo sargıları ..... 35
Şekil 4.7. a) A ve b) B tipi (Doğru ve Ters) bağlı regülatör şeması ..... 35
Şekil 4.8. A tipi regülatör iç şeması ..... 36
Şekil 4.9. a) A ve b) B tipi regülatör prensip şeması ..... 37
Şekil 4.10. a) Mantel tipi ve b) çekirdek tipi reaktör ..... 37
Şekil 4.11. a) Cooper CL-6 ve b) Toshiba TB-R1000 kontrol panelleri ..... 38
Şekil 4.12. Kademe değiştirici yapısı ..... 39
Şekil 4.13. a) Bağlantı yapısı ve b) kontak plakaları ..... 39
Şekil 4.14. Ters yön 1. kademede a) bağlantı, b) kontak durumu ..... 40
Şekil 4.15. Ters yön 2. kademede a) bağlantı, b) kontak durumu ..... 40
Şekil 4.16. Oto trafo ..... 41
Şekil 4.17. Kademe değiştirici göstergesi ..... 41
Şekil 4.18. Regülatör prensip şeması a) yükseltme b) alçaltma işlemi ..... 42
Şekil 4.19. Seri sargı a) yön ve b) kademe değiştirme sistemi ..... 43
Şekil 4.20. Reaktör ile kademe geçiş sistemi a) 0. kademe b) 1. kademe ..... 43
Şekil 4.21. Simetrik iki hareketli a) bağlantı, b) kontak pozisyonu ..... 44
Şekil 4.22. Asimetrik pozisyonda bir hareketli kontak ..... 44
Şekil 4.23. Köprü durumu iki hareketli a) bağlantı, b) kontak pozisyonu ..... 45
Şekil 4.24. Kademe değişiminde gerilim fazör diyagramı ..... 45
Şekil 4.25. Tek fazlı a) bağlantı ve b) tek hat şeması ..... 47
Şekil 4.26. Yıldız a) bağlantı ve b) tek hat şeması ..... 47
Şekil 4.27. Yıldız bağlı regülatör uygulama örneği ..... 48
Şekil 4.28. a) Yıldız bağlantı ve b) fazör diyagramı ..... 48
Şekil 4.29. Direk tipi yıldız bağlantı uygulama örneği ..... 49

Şekil 4.30. Kapalı üçgen bağlantı uygulama örneği ....50
Şekil 4.31. Kapalı üçgen a) bağlantı ve b) tek hat şeması ....51
Şekil 4.32. Kapalı üçgen a) bağlantı ve b) fazör diyagramı ....51
Şekil 4.33. Açık üçgen a) bağlantı ve b) tek hat şeması ....52
Şekil 4.34. Açık üçgen a) bağlantı ve b) fazör diyagramı ....52
Şekil 4.35. Açık üçgen bağlantı uygulama örneği ....53
Şekil 4.36. LDC Gerilim kontrolü yapısı ....54
Şekil 4.37. Regülatör devre dışı....56
Şekil 4.38. Regülatör devrede ....56
Şekil 5.1. Ezine TM Ayvacık 2 fideri coğrafik modeli....57
Şekil 5.2. Ezine TM Ayvacık 2 fideri tek hat şeması....59
Şekil 5.3. %100 Yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum analizi....61
Şekil 5.4. 1. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri ....61
Şekil 5.5. %100 Yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum analizi....62
Şekil 5.6. 2. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri ....62
Şekil 5.7. %50 Yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum analizi....63
Şekil 5.8. 3. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri ....63
Şekil 5.9. %50 Yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum analizi....64
Şekil 5.10. 4. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri ....64
Şekil 5.11. %0 Yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum analizi....65
Şekil 5.12. 5. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri ....65
Şekil 5.13. %0 Yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum analizi....66
Şekil 5.14. 6. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri ....66
Şekil 5.15. %120 Yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum analizi....67
Şekil 5.16. 7. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri ....67
Şekil 5.17. %120 Yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum analizi....68
Şekil 5.18. 8. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri ....68
Şekil 5.19. 1. senaryo Bölge 2'de yatırım sonucu gerilim grafikleri ....70
Şekil 5.20. 6. senaryo Bölge 2'de yatırım sonucu gerilim grafikleri ....70
Şekil 5.21. 1. senaryo gerilim regülatörü ilavesiyle yük analizi....74
Şekil 5.22. 1. senaryoda OG regülatör sonrası gerilim profili ....74
Şekil 5.23. 6. senaryo gerilim regülatörü ilavesiyle yük analizi....75
Şekil 5.24. 6. senaryoda OG regülatör sonrası gerilim profili ....75
Şekil 5.25. 3 Fazlı regülatör modelleri a) Siemens b) Cooper (Eaton) ....76
Şekil 5.26. Tuzla KÖK giriş akım değerleri ....79
Şekil 5.27. Tuzla KÖK faz-faz gerilim değerleri....80
Şekil 5.28. Ayvacık DM Tuzla KÖK güce göre gerilim farkı....81
Şekil 5.29. Tuzla JES reaktif güç profili....81
Şekil 5.30. Tuzla JES regülatör öncesi güç profili ....82
Şekil 5.31. Şebeke kaybı simülasyon sonuçları ....83
Şekil 5.32. Şebeke kayıplarına göre kayıptan elde edilen kazanç....83
Şekil A.1. A-A Kesiti montaj planı....93
Şekil A.2. B-B Kesiti montaj planı....94
Şekil A.3. Tek hat şeması ....95
Şekil A.4. Üst görünüş ....96
Şekil A.5. Yerleşim planı ....97
Şekil A.6. Montaj resmi ....98

## TABLOLAR DİZİNİ


Tablo 2.1. Fliker limitleri ..... 13
Tablo 2.2. Harmonik limitleri ..... 13
Tablo 2.3. Kesinti sınıflandırması ..... 14
Tablo 2.4. Kesinti sayı ve süreleri ..... 15
Tablo 2.5. Teknik kalite sınır değerleri ..... 16
Tablo 2.6. IEEE 1159 ile EN 50160 karşılaştırması ..... 17
Tablo 2.7. Uluslararası güç kalitesi uygulama örnekleri ..... 17
Tablo 5.1. Şebeke varlıkları ..... 58
Tablo 5.2. Trafo sayıları ..... 58
Tablo 5.3. Analiz senaryoları ..... 60
Tablo 5.4. Analiz sonuç tablosu ..... 69
Tablo 5.5. OG regülatör üreticileri ve akım gerilim limitleri ..... 78

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| d | : Hat boyu, (m) |
| $Fat_p$ | : Hat kayıp faktörü (%) |
| $Fat_v$ | : Gerilim düşüm faktörü, (%) |
| $I_L$ | : Yük akımı, (A) |
| $I_{sc}$ | : Kısa devre akımı, (kA) |
| K | : Yıllık faiz oranı, (%) |
| ke | : Enerji ücreti, (TL/kWh) |
| kp | : Yıllık talep ücreti, (TL/kWxYıl) |
| LVUR | : NEMA Gerilim dengesizliği indisi, (%) |
| M | : Hat sayısı |
| N | : Zaman periyodu, (Yıl) |
| $PLj_0$ | : Gerilim regülatöründen önce hat kaybı, (kW) |
| $PLj_f$ | : Gerilim regülatöründen sonra hat kaybı, (kW) |
| $P_{lt}$ | : Uzun dönem fliker |
| $P_{st}$ | : Kısa dönem fliker |
| PVUR | : IEEE Gerilim dengesizliği indisi, (%) |
| R | : Hat direnç, (Ohm) |
| $T_y$ | : Yıllık enerji kazancı, (kWh) |
| $U_n$ | : Nominal gerilim, (V) |
| V | : Hat sonu gerilimi, (V) |
| $V_-$ | : Negatif sıra bileşen |
| $V_+$ | : Pozitif sıra bileşen |
| $V_0$ | : Hat başı gerilimi, (V) |
| $V_a$ | : Faz gerilimi A fazı, (V) |
| $V_{ab}$ | : Hat gerilimi A-B fazları, (V) |
| $V_b$ | : Faz gerilimi B fazı, (V) |
| $V_{bc}$ | : Hat gerilimi B-C fazları, (V) |
| $V_c$ | : Faz gerilimi C fazı, (V) |
| $V_{ca}$ | : Hat gerilimi C-A fazları, (V) |
| $Vi_0$ | : Gerilim regülatöründen önce bara gerilimi, (V) |
| $Vi_f$ | : Gerilim regülatöründen sonra bara gerilimi, (V) |
| $V_{ort}$ | : 3 Faz gerilim ortalaması, (V) |
| VUF | : IEC Gerilim dengesizliği indisi, (%) |
| X | : Hat reaktansı, (Ohm) |
| ΔV | : Birim uzunluktaki gerilim düşümü, (V) |

### Kısaltmalar

| | |
|---|---|
| AC | : Alternating Current (Alternatif Akım) |
| AG | : Alçak Gerilim |
| ANSI | : American National Standards Institute (Amerikan Ulusal Standart Enstitüsü) |
| AWG | : American Wire Gauge (Amerikan İletken Standardı) |
| BSES | : Backup Storage Energy Supply (Enerji Kaynağı Depolama Sistemi) |
| DÜ | : Dağıtık Üretim |
| EDAŞ | : Elektrik Dağıtım Anonim Şirketleri |

| | |
|---|---|
| EPDK | : Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu |
| EÜAŞ | : Elektrik Üretim Anonim Şirketi |
| ESB | : Electricity Supply Board (İrlanda Elektrik Dağıtım Şirketi) |
| GR | : Gerilim Regülatörü |
| IEC | : The International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu |
| IEEE | : The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) |
| LVR | : Line Voltage Regulator (Hat Gerilim Regülatörü) |
| MCM | : Mega Circular Mile (Mega Dairesel Çap) |
| NEMA | : National Electrical Manufacturers Association (Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği) |
| OG | : Orta Gerilim |
| OKSIK | : Ortalama Kesinti Sıklığı Endeksi |
| OKSÜRE | : Ortalama Kesinti Süresi Endeksi |
| OLTC | : On Load Tap Changer (Yük Altında Kademe Değiştirici) |
| PV | : Photovoltaic (Fotovoltaik) |
| SAIDI | : System Average Interruption Duration Index (Sistem Ortalama Kesinti Süresi Endeksi) |
| SAIFI | : System Average Interruption Frequency Index (Sistem Ortalama Kesinti Sayısı Endeksi) |
| SCADA | : Supervisory Control and Data Acquisition (Uzaktan İzleme ve Kontrol Sistemi) |
| SPD | : Scottish Power Distribution (İskoç Enerji Dağıtım Şirketi) |
| SSTS | : Solid State Transfer Switch (Katı Hal Yönlendirme Anahtarı) |
| STATCOM | : Distribution Static Compensator (Dağıtım Sabit Kompansatör) |
| SVC | : Static Var Compensator (Sabit Reaktif Kompansatörü) |
| SVR | : Step Voltage Regulator (Kademeli Gerilim Regülatörü) |
| TDDI | : Toplam Demand distorsiyonu, (%) |
| TEDAŞ | : Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi |
| TEİAŞ | : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi |
| THD | : Toplam harmonik distorsiyonu, (%) |
| THDI | : Toplam akım harmonik distorsiyonu, (%) |
| TM | : Trafo Merkezi |
| UEDAŞ | : Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş. |
| UK | : United Kingdom (Birleşik Krallık) |
| UL | : Underwriters Laboratories (Sigortacılar Laboratuvarı) |
| YG | : Yüksek Gerilim |

**TÜRKİYE ORTA GERİLİM ENERJİ DAĞITIM SİSTEMİNDE TEK FAZLI GERİLİM REGÜLATÖRÜ UYGULAMASININ İNCELENMESİ**

## ÖZET

Bu çalışma ile ülkemizde elektrik dağıtım sisteminde orta gerilim seviyesinde ilk defa Ar-Ge projesi olarak hayata geçirilen otomatik gerilim regülatörü uygulamasının tanıtılması ve ortaya çıkan sonuçların paylaşılması amaçlanmıştır.

Türkiye'deki elektrik dağıtım şirketleri "Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği" isimli yönetmelikte belirtilen teknik kalite parametrelerine uymakla yükümlüdürler. Söz konusu yönetmelikte teknik kalite, dağıtım sistemi kullanıcılarının elektrik enerjisi talebini; gerilimin frekansı, genliği, dalga şekli ve üç faz simetrisi açısından kabul edilebilir değişim sınırları içerisinde kesintisiz ve kaliteli bir şekilde karşılayabilme kapasitesi şeklinde tanımlanmıştır. Öncelikle elektrik dağıtım şirketlerinin uymakla yükümlü olduğu hizmet kalitesi yönetmeliğinin belirlediği teknik kalite parametrelerinin bilinmesi gerektiğinden bu parametrelerin tanıtımı ve şebekeye olan etkileri değerlendirilmiş ve bunlardan etkin gerilim değişimi konusu incelenmiştir. Bu inceleme sonucu özellikle dağıtık üretim santrallerinin şebekeye bağlanması ve aşırı uzun hatların etkilerinin büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Ülkemizde yaygınlaşan dağıtık üretim santrallerinin şebekeye entegrasyonu ile bunun etkilerine öncelik vererek problemin çözümü için belirlediğimiz pilot bölgede gerekli analizler yapılmıştır. Analizler için PSS SINCAL programında şebeke modellenerek sonuçlar elde edilmiştir. Bu analizlerde ihtiyaç duyulan farklı çözüm yöntemleri de değerlendirilmiştir. Bunlardan en uygun çözüm olarak gerilim regülatörü sonucuna varılmıştır.

Bu kapsamda özellikleri ve tanımı yapılan gerilim regülatörleri için uygun gördüğümüz marka ve model regülatör, analizler sonucu uygun görülen noktaya tesis edilerek çalışması incelenmiştir. Şebekeden alınan veriler doğrultusunda yapılan incelemeler sonrasında fayda maliyet analizleri yapılmış ve sonuçları ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Gerilim Regülasyonu, Güç Kalitesi, OG Gerilim Regülatörü.

**EXAMINATION OF SINGLE-PHASE VOLTAGE REGULATOR APPLICATION IN THE TURKEY MEDIUM VOLTAGE POWER DISTRIBUTION SYSTEM**


## ABSTRACT

In our thesis, it is aimed to introduce the application of automatic voltage regulator in a scope of an R&D project, which is the first project realised in the medium voltage distribution level in Turkey, and to present and to share the results of the application.

Electric distribution companies in Turkey are liable for meeting the rules of technical quality parameters given in the regulation named “Regulation on Service Quality in Electricity Distribution and Retail Sale”. Technical quality is described in this regulation as the capacity of distribution system to meet electrical energy demand of users within acceptable fluctuation limits in terms of voltage frequency, amplitude, waveform and three phase symmetry, continuously and with high quality. First, the definitions of the above mentioned quality parameters and their effects to grids are evaluated in our study. Among these parameters, the change of RMS voltage value is investigated especially. As a result of this investigation, it is observed that distributed generation units and long distribution lines are the main causes of RMS voltage change.

Due to the high penetration of distributed generation units in Turkey, we focused on their impacts on electric grids. In order to propose a solution for this problem, we performed some analysis in a pilot area. Grid model was created for detailed analysis in PSS SINCAL program and the results were obtained. In these analysis, different solutions of this problem were evaluated and using of voltage regulator was observed as the most suitable solution.

Accoding to the results of the analysis, a voltage regulator, which was chosen most effective among different make and model, was placed on the most suitable part of the grid and its operation performance was monitored. By using real data gathered from the grid, cost benefit analysis were performed and the results of these investigations were presented.



**Key Words:** Voltage Regulation, Power Quality, MV Voltage Regulator.

## GİRİŞ

Elektrik enerjisi, kullanım şekli ve diğer enerji çeşitlerine dönüşüm kolaylığı bakımından günlük hayatta kendine fazlasıyla yer bulan ve hayati önem taşıyan bir enerji çeşididir. Bunun yanı sıra nüfus artışı, sanayileşme ve teknolojinin gelişimine bağlı olarak elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç miktarı da her geçen gün artmaktadır. Üstelik depolama imkânının zor ve maliyetli olması ayrıca üretildiği yerde tüketilmesi beklentisi de önemli bir arz talep dengesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte sürekli değişken olan ve yılın belirli zamanlarında ihtiyaç duyulan en yüksek talep gücüne göre altyapı tesisi zorunluluğu, yatırım maliyeti açısından ilave yükler getirmektedir.

Bunun için enerji ihtiyacını sadece yeni üretim santralleri ile kapasite artışına giderek çözmek yeterli olmayıp, bunun yanında her safhada olabildiğince verimli bir şekilde kullanarak kayıpların asgariye indirilmesi de tüm kullanıcılar açısından dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Böylelikle üretilen elektrik enerjisinin kullanımı için sistemin hassas dengelerle işletilmesi, verimin artmasını ve sistemin etkin bir şekilde yönetilmesini sağlayacaktır.

Bu öngörü ile yaptığımız çalışmamızda, OG enerji dağıtım hatlarında oluşan güç kalitesi problemleri ve kayıpları inceleyerek bilinen çözümler araştırılmış, özellikle güç kalitesi problemlerinden gerilim düşümü konusuna dikkat çekerek olası etkileri belirlenip problemin minimize edilmesi için tesis ettiğimiz OG tek fazlı gerilim regülatörü (SVR) uygulamasının sonuçları ortaya konulmuştur.

Elektrik dağıtım sisteminin orta gerilim seviyesinde, güç kalitesi parametrelerinden gerilim regülasyonunun önemli bir güç kalitesi problemi ve dağıtım hatlarındaki enerji kayıplarına etkisi olduğu bilinmektedir. İlgili bu problemin etkili bir şekilde minimize edilmesi ise uygun yere tesis edilmiş otomatik gerilim regülatörü ile sağlanacağı değerlendirilmektedir.

Ayrıca bu çalışma ile ülkemizde sadece Ar-Ge projelerine konu olmuş orta gerilim seviyesinde otomatik gerilim regülatörünün tanıtımı ve şebekede çalışma şartlarının belirlenmesi için uygun konumlandırma metodolojisi üzerinde araştırma yapılmıştır.

Böylelikle ülkemizde henüz kullanımı yaygınlaşmamış OG Gerilim Regülatörü (Step Voltage Regulator) uygulaması ile teknik kalitede gerilim regülasyonu ve enerji kayıplarına etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın birinci kısmında, genel bilgiler başlığı altında enerjinin temini, kayıplar ve güç kalitesi hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde ise güç kalitesi parametreleri ve kayıplara etkisi detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, güç kalitesi problemlerinden gerilim regülasyonunun etkileri, çözümleri ve neden otomatik gerilim regülatörü kullanıldığı konusu ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde, gerilim regülatörlerinin tanıtımı, özellikleri, çalışma prensibi ve kullanımı hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde, uygulama projesi için analizler, pilot bölge yerinin belirlenmesi, montaj ve devreye alma ile sağladığı faydalar hakkında elde ettiğimiz veriler incelenmiştir.

Altıncı bölümde ise sonuçlara yer verilerek değerlendirme ve fizibilite yapılmıştır.

Böylelikle enerji dağıtım sisteminde henüz kullanımı yaygınlaşmamış bir ürün olan OG gerilim regülatörü uygulamasının sonuçları ortaya konarak faydaları incelenmiştir.

## 1. GENEL BİLGİLER

Genel olarak elektrik enerjisinin elde edilip son kullanıcıya ulaşması üretim, iletim ve dağıtım olarak üç safhada gerçekleşmektedir. Ülkemizde bu üç safha da ayrı kurumlar tarafından yürütülmektedir. Şu an itibarıyla bunlardan Üretim (EÜAŞ) santrallerinin bir kısmı özelleşmiş, Dağıtım (EDAŞ) tamamen özel sektör işletmesinde ve İletim (TEİAŞ) ise iktisadi teşekkül olarak devlet tarafından yönetilmekte olup enerji iletiminin yanı sıra üretim ile dağıtım arasındaki arz talep dengesini sağlayıcı kurum olarak görev üstlenmektedir [2].

Bu üç safhada da birçok donanım kullanılarak santrallerde üretilen elektrik enerjisi; iletim hatları, transformatörler, dağıtım hatları ve yardımcı birçok donanım vasıtası ile kapımıza kadar gelmektedir. Fakat elektrik enerjisinin yapısı gereği bu safhalarda kullanılan bütün bu donanımlarda enerji sarfiyatı veya kayıplar oluşmakta, dolayısıyla enerjinin verimi düşmektedir. Her bir donanım kendi başına oldukça verimli olarak gözükse de ülke genelinde veya büyük coğrafyalarda çok büyük enerji akışları söz konusu olduğu için toplam kayıplarda önemli değerlere ulaşabilmektedir.

Dünyada elektrik enerjisinin kullanımına ilişkin genel kabul görmüş ortalama sistem maliyetleri göz önüne alındığında bu maliyetlerinin %50'si üretimde, %20'si iletimde ve %30'u ise enerjinin dağıtımında harcandığı bilinmektedir [1].

Bu maliyetlerin içerisinde işletme giderlerinin yanı sıra her safhada büyük kayıpların olduğunu belirtmiştik. Kayıplar incelendiğinde ise bu durumun aksine önemli bir bölümü iletim ve dağıtım sisteminde oluşmaktadır.

Üretilen enerjinin, iletim tesislerinde yaklaşık %2'si, dağıtım tesislerinde ise teknik kayıpların ve kayıp-kaçak oranının yüksek olmasından dolayı %12,1'i kayıp enerji olarak harcandığı bilinmektedir [3]. %6 gibi üretim kaybı da eklenerek bu oranlara bakıldığında toplam üretilen enerjinin yaklaşık %20'sinin kayıpları karşıladığı ve dolayısıyla büyük bir enerji kaynağının yok olduğu görülmektedir [1].

2018 yılı sonu itibariyle dağıtım sisteminde 162.367 MVA gücünde 468.755 adet trafo bulunmaktadır. Dağıtım hatlarının uzunluğu ise 1.164.170 km'dir. Bu rakamın 954.411 km'sini havai hatlar, 209.759 km'sini de yeraltı hatları oluşturmaktadır [6].

Sistemlerde kullanılan donanımların verimleri yüksek olsa dahi şebeke toplamında büyük miktarda güç kaybı ve gerilim düşümü oluşmaktadır. Kullanılan malzemelerden kaynaklı kayıplar standartlarla belirlenir ve bu durum üretici firmaların müdahale edebileceği bir husustur. İşletmeci gözünden bakıldığında ise enerjinin kullanımına yönelik tedbirler oldukça önem arz etmektedir.

Elektrik sisteminin geneline baktığımızda, özellikle dikkati çeken husus hat kayıpları ve trafo kayıplarıdır. Bu sebeple her abonenin kapısına kadar elektrik ulaştıran dağıtım sistemini mercek altına almak gerekir. Çünkü dağıtım sistemini incelediğimizde oldukça uzun mesafelerde hatlara sahip olmakla birlikte, enerji dağıtımında kayıpların büyük bir kısmının hatlarda oluştuğu bilinmektedir.

Yine diğer bir taraftan sistemlerin verimli olarak çalışması için temel gerekliliklerin başında kaliteli bir hammadde girdisi geldiğidir. Bu durum elektrik enerjisi için de geçerlidir. Bu kapsamda enerji kalitelisini arttırarak sistemdeki kayıplara etkisinin incelenmesi gereklidir.

Bunun için öncelikle literatür taraması yapılmış sonrasında ise teknik kalite parametreleri ve yönetmeliklerin belirlediği kriterlere bakılmıştır.

### 1.1. Gerilim Regülasyonu Literatür Taraması

Dünyada dağıtık üretim birimlerinin şebekeye entegrasyonu ile çalışmalar ülkeler bazında devam etmektedir. Gerilim yükselmelerinin önüne geçmek için Norveç dağıtım sistemi üreticileri gerilim regülatörleri kullanmaktadırlar. Norveç'te dağıtık üretim tesislerinin şebekeye entegrasyonu neticesinde fider kesitini arttırmak veya gerilim seviyesini yükselterek şebekeyi güçlendirmek istenmektedir [4].

UK kıtasında da yoğun bir şekilde kullanılan otomatik gerilim regülatörleri, adanın kuzey bölgesinde hizmet veren SPD dağıtım şirketi tarafından, düşük karbonlu gelecek için esnek şebekeler projesi kapsamında şebekenin gelişimi için önemli olduğunu belirtmektedir [5].

Diğer bir yöntem ise gerilim düşümü problemini, iletim şebekesinde bulunan TM’ler den daha fazla sayıda tesis ederek birden fazla bağlantı noktası oluşturmak suretiyle çözmektir. Bu durumda orta gerilim şebekesinin tekrar tasarlanması gerekecektir. Bu alternatif yöntemde uzun bir OG fiderinden ziyade daha kısa fiderlerle besleme yöntemine doğru gidiş söz konusu olur. Yine de şebekeyi güçlendirmek için yapılacak yeni yatırımlar yüksek maliyetlidir.

Orta gerilim şebekelerinde gerilim regülasyonu YG/OG trafo merkezlerindeki yükte kademe değiştiriciler tarafından düzenlenmektedir. Buna rağmen dağıtık üretim tesislerinin yüksek yoğunlukta bulunduğu bölgelerde yükte kademe değiştiriciler gerilimi izin verilen maksimum değerin altında tutamayabilir. Böyle bir durumda ek olarak fider üzerinde gerilim regülasyonu yapılması gerekir. Özellikle zayıf OG şebekelerinde dağıtık üretim sebebiyle oluşan gerilim yükselmeleri, tüm fideri güçlendirmek zorunda kalmadan, gerilim regülatörü kullanarak düzenlenebilir [4].

Japonya'da ise Watanabe ve diğerleri (2013), PV panellerinin kullanımın artmasıyla birlikte ortaya çıkan gerilim problemlerine çözüm yöntemi olarak gerilim regülatörü kullanılmış olup gerilim sapmasını %84,5'e kadar azaltıldığını belirtmektedir [7].

Ayrıca İsveç'te yoğun rüzgâr enerji santrallerinin bulunduğu bilinmektedir. Burada örnek bir kırsal şebeke için günlük yük eğrilerinden yola çıkarak gerilim profilleri çıkartılmıştır. Daha sonra analiz çalışmasıyla farklı noktalara gerilim regülatörleri eklenerek etkileri incelenmiş ve regülatör kademe sayılarının belirlenmesinde yardımcı olmuştur [8].

Yine Tanzanya'da Dünya Bankası destekli dağıtım şebekesi iyileştirme projesi kapsamında 11/33 kV seviyesinde booster trafolar kullanılmıştır [9].

Almanya'da ise üretim tesislerinin yenilenebilir enerji kaynaklarına dönüşümü sırasında dağıtım sisteminde eklenen güneş ve rüzgâr santrallerinin özellikle düşük yoğunluklu tüketimin veya uzun hatların bulunduğu kırsal şebekede gerilim artışlarıyla karşılaştığı ve LVR ile çözüm bulunduğu belirtilmektedir [30].

Safigianni ve Salis (2000), çalışmalarında radyal şebekelerde optimum gerilim regülatörü sayısı ve konumu için doğrusal arama algoritması geliştirilmiştir. Fakat bu çalışma için yük değişiminin etkisi ihmal edilmiştir. Bu algoritma da başlangıç olarak GR'nin yerleşimi ve kademe ayarı ayarlanır. Daha sonra sistem içerisindeki daha düzgün gerilim profili için GR'lerin yerleşiminde ve kademe ayarından değişiklikler ve optimizasyonlar yapılmaktadır [26].

Souza ve diğerleri (2005) ise radyal dağıtım şebekelerinde gerilim regülatörlerinin boyutunu ve yerleşimini bulmak için genetik algoritmasını yöntem olarak sunmuşlardır. Genetik algoritmasında ilk olarak GR'lerin yerleştirilmesi için ana fider belirlenir. Bu fiderdeki bütün baralara kod değerleri verilir. Kodlara uygun program yazılarak GR'nin yerleşimi ve kademe sayısı belirlenmektedir. Bu algoritmanın

oluşturulmasında gerilim profilinin nominal değer aralığında olması, kayıpların ve maliyetlerin azaltılması gibi parametreler önemli rol oynar [27].

Gonzalez-Moran ve diğerleri (2018) SVR bağlantı çeşitlerine göre etkilerini incelemek için dört noktalı ölçüm ile gerekli testleri yapmışlardır [29].

Reddy ve diğerleri (2013) ise uygun regülatör yerleşiminin tespiti için bulanık mantık ile oluşturdukları bilgisayar algoritmasını kullanmışlardır. Bu algoritma ile hat boyunca çözümleri deneyerek uygun gerilim düşümü değerlerini analiz ederek regülatör yerlerini, sonrasında da sayısını optimize etme mantığı işletilmektedir [35]. Filho ve Medeiros (2013) ise aynı işlem için “Tabu Arama” algoritmasını kullanmışlardır [36].

İrlanda’da hizmet veren ulusal elektrik dağıtım şirketi (ESB), yıllardır OG seviyede regülatör kullanmaktadır. Fakat dağıtıma gömülü üretim santrallerinin artması ile şebekede beklenmedik sorunlarla karşı karşıya kalmışlardır. Özellikle santraller sisteme aktif güç gönderirken sistemden reaktif güç çekmeleri, klasik regülatörlerin dengesiz çalışmasına sebep olduğunu belirtmektedir [39].

# 2. GÜÇ KALİTESİ

Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım sisteminden oluşan şebeke yapısı içerisindeki kayıpları etkileyen önemli bir etken “Güç Kalitesi Parametreleri” olduğu bilinmektedir [31]. Bunun için elektrik enerjisinde güç kalitesi veya teknik kalitenin tanımının detaylı bir şekilde yapılması gerekmektedir.

Öncelikle elektrik enerjisi için güç kalitesinin tanımını yapmamız gerekirse; tüketicilerin dağıtım sisteminden aldıkları elektrik enerjisinin gerilim, frekans ve faz açı değerleri korunarak, dalga şeklinin bozulmaksızın kesintisiz ve ekonomik bir şekilde son kullanıcıya kadar ulaşması olarak ifade edebiliriz.

Dağıtım sisteminin temel amacı ise, iletim sistemi ile kullanıcılar arasında gerekli tedarik için güvenilir şartlar altında kesintisiz enerji sağlamaktır. Dağıtım sistemleri şebekeyi etkin bir şekilde işletebilecek gerekli koruma ve kontrol donanımlarına sahiptirler. Fakat endüstriyel süreçler içerisinde bu her zaman mümkün olmamakla birlikte, gerilim dengesizliği, harmonikler, gerilim düşümü ve yükselmeleri gibi çeşitli etkiler oluşabilmektedir [34].

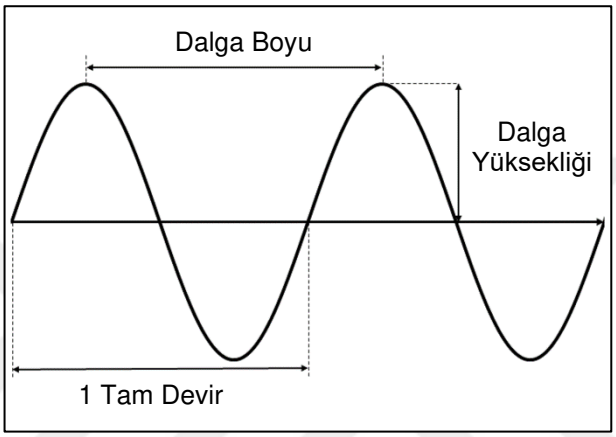
Bu çerçevede kalite parametrelerini ve sisteme etkilerini aşağıdaki şekilde anlatabiliriz.

## 2.1. Güç Kalitesi Parametreleri

Teknik kalite tanımının belirlediklerini ölçmek ve yerine getirmek için beli başlı parametreler bulunmaktadır. Bunlar ülkemizde IEC 61000-4-30 standardına göre ölçülerek aynı isimli Avrupa normuna atıfla TS EN 50160 standardının raporları referans alınarak belirlenir. İlgili standartlarda besleme gerilimi karakteristiklerini AG, OG ve YG seviyelerinde 3 kategoride değerlendirilmekte olup çalışmamızda OG seviyesi için referans değerler anlatılmıştır. Bu parametreler genel olarak frekans, etkin gerilim değeri, gerilim düşümleri, aşırı gerilimler, harmonikler, gerilim dengesizliği, fliker, transient, çentik, gürültü, dalga şekil bozulumu, gerilim dalgalanmaları, uzun süreli kesintiler gibi birçok parametresi mevcuttur. Bunlardan ilgili standardın zorunlu kıldığı parametreleri aşağıdaki şekildedir.

### 2.1.1. Frekans

Alternatif akım elektrik enerjisinin sahip olduğu alternansların, saniyedeki tekrarlanma sayısı olarak ifade edilen frekans, üretim santrallerindeki alternatörlerin fiziki yapısından kaynaklı olarak dairesel hareketin zamana göre değişimi ile sinüs dalga formunda oluşmaktadır. Sinüs şeklindeki elektrik sinyali Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Ülkemizde frekansın anma değeri 50 Hz olup TEİAŞ tarafından çok hassas bir şekilde 49,8-50,2 Hz aralığında kontrol edilmektedir [10].




Şekil 2.1. Frekans illüstrasyon

Yine de kararsız işletme koşulları oluşabileceğinden bu değereler ilgili standartla normal şartlarda 10 sn. boyunca ölçülen temel frekansın ortalama değerleri aşağıdaki şeklinde olmalıdır [11].

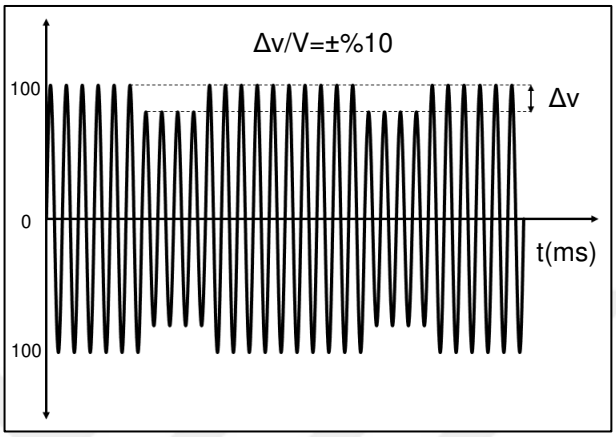
Enterkonnekte sisteme senkron bağlantılı sistemler için;
- 50 Hz ± %1 (49,5 Hz…50,5 Hz) bir yılın %99,5'i boyunca,
- 50 Hz + %4 /- %6 (47 Hz…52 Hz) her zaman (%100).

Enterkonnekte sisteme senkron bağlantılı olmayan sistemler için;
- 50 Hz ± %2 (49 Hz…51 Hz) bir haftanın %95'i boyunca,
- 50 Hz ± %15 (42,5 Hz…57,5 Hz) her zaman (%100).

### 2.1.2. Etkin gerilimi değeri

Elektrik sinyalinin genliği ile ifade edilen gerilim değerinin, kesintili periyotlar dışında, normal çalışma şartları altında Şekil 2.2'de görüldüğü gibi Un'nin ±%10'u aşmaması esastır.

OG seviyesi için; kesintili periyotlar dışında, normal çalışma şartları altında TS EN 61000-4-30'da tanımlanan ölçüm periyodu boyunca ölçülen gerilimin etkin değerlerinin onar dakikalık ortalamalarının, en az %99'u nominal etkin gerilim değerinin en fazla ±%10'u kadar, tamamı ise nominal etkin gerilim değerinin en fazla ±%15 aralığında değişmelidir [12].

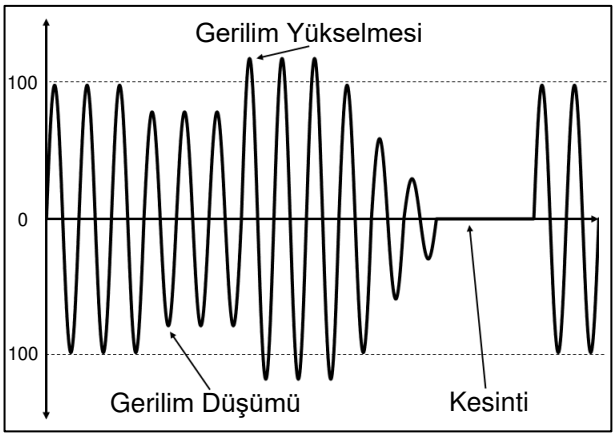



Şekil 2.2. Gerilim düşümü

AG seviyesinde ise aynı ölçüm periyodu için en az %95'i nominal etkin gerilim değerinin ±%10'u kadar, tamamı ise nominal etkin gerilim değerinin en fazla +%10-%15 aralığında olmalıdır [12].

### 2.1.3. Gerilim olayları

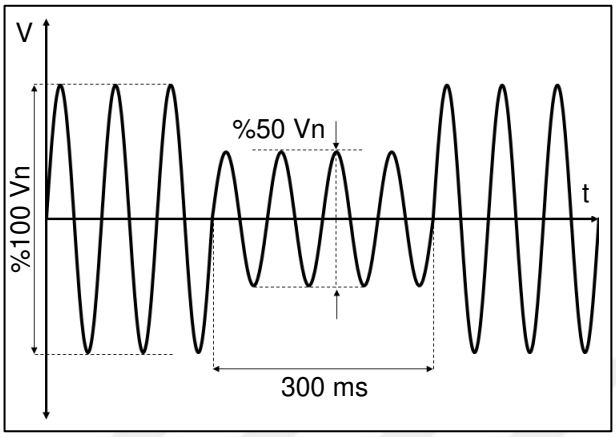
EN 50160 standardına göre besleme geriliminin nominal değerinin değişimlerini farklı kategorilerde değerlendirilmektedir. Bunlar gerilim seviyesine göre, Gerilim Düşümü, Gerilim Yükselmesi ve Kesinti olarak ifade edilen Şekil 2.3'te görülen olaylardır.




Şekil 2.3. Gerilim olayları görseli

### 2.1.3.1. Gerilim düşmesi (Sag)

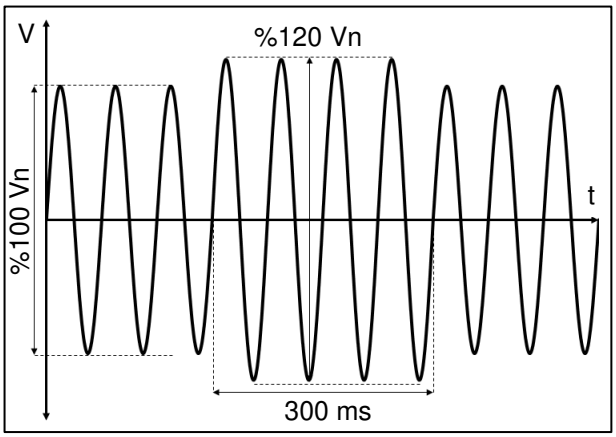
Nominal besleme gerilim değerinin %5 ila %90 arasındaki bir değere, 10 ms ila 1 dk. süresince düşmesi olayına denir. Bu tanım Şekil 2.4'te gösterilmiştir.




Şekil 2.4. Gerilim düşmesi

### 2.1.3.2. Gerilim yükselmesi (Swell)

Nominal besleme gerilim değerinin %110 üzerindeki bir değere, 10 ms (yarım periyot) ila 1 dk. süresince aşması olayına denir. Bu tanım Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



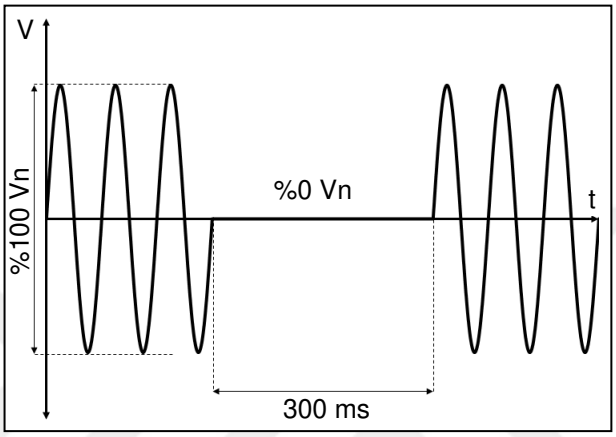

Şekil 2.5. Gerilim yükselmesi

### 2.1.3.3. Transient

Gerilim olayları içerisinde 10 ms altında oluşan aşırı gerilim sapması olayıdır. Ağırlıklı olarak aşırı gerilim yükselmesi olayına karşı ölçüm ve koruma yapılmaktadır. Sistem içerisindeki çeşitli manevralardan veya yıldırımdan kaynaklanabilir. TS EN 50160 standardı 10 ms altındaki gerilim düşümü olayını tanımlamamıştır.

### 2.1.3.4. Kesinti (Interruption)

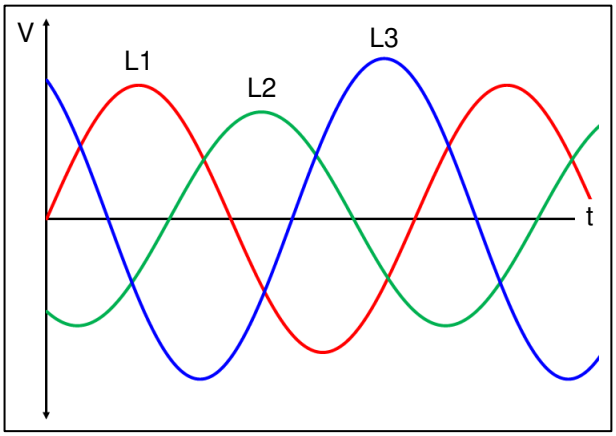
İlgili standart, şebeke gerilim değerinin %5'in altına düşmesi durumunu veya gerilim düşümü olayının 1 dk. dan uzun sürmesi durumunu kesinti olarak tanımlamaktadır. Kesintilerde ise 1 dk. altındaki kesintiyi geçici kesinti, 1 dk. ila 3 dk. arasını kısa kesinti, 3 dk. dan uzun süreli kesintiyi uzun kesinti olarak tanımlamaktadır. Bu tanım Şekil 2.6'da gösterilmiştir.




Şekil 2.6. Gerilim kesintisi

### 2.1.4. Gerilim dengesizliği

Ölçüm periyodu boyunca ölçülen gerilim negatif bileşenin etkin değerlerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının en az %95'inin pozitif bileşenlere oranı en fazla %2 olmalıdır. Tek fazlı veya iki fazlı yüklerin beslendiği noktalarda bu oran %3'e kadar tolerans gösterilmektedir. Fazlar arası gerilim dengesizliği Şekil 2.7'de gösterilmiştir.




Şekil 2.7. Gerilim dengesizliği

Gerilim dengesizliği dünya çapında NEMA, IEEE, IEC gibi farklı otoriteler standartlarında farklı şekilde ifade etmişlerdir [28].

Bunlardan NEMA standardı dengesizlik oranını LVUR indisi ile tanımlayarak,

$$LVUR(\%)=\frac{Maks[|V_{ab}-V_{ort}|,|V_{bc}-V_{ort}|,|V_{ca}-V_{ort}|]}{V_{ort}}x100 \quad (2.1)$$

şeklinde formüle edilmiştir. Denklem (2.1)'de ifade edilen $V_{ort;}$

$$V_{ort}=\frac{V_{ab+}V_{bc+}V_{ca}}{3} \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanır. Denklem (2.2)'deki gerilimler faz-faz arası gerilimlerdir.

IEEE standardında PVUR indisi ile tanımlamış ve hat gerilimleri yerine faz gerilimlerini kullanmıştır. Buna göre,

$$PVUR(\%)=\frac{Azami[|V_a-V_{ort}|,|V_b-V_{ort}|,|V_c-V_{ort}|]}{V_{ort}}x100 \quad (2.3)$$

şeklinde formüle edilmiştir. Denklem (2.3)'te ifade edilen $V_{ort;}$

$$V_{ort}=\frac{V_{a+}V_{b+}V_c}{3} \quad (2.4)$$

şeklinde hesaplanır. Denklem (2.4)'teki gerilimler faz-toprak arası gerilimlerdir.

IEC standardı ise VUF indisini kullanarak dengesizlik tanımında simetrik bileşenleri kullanmıştır. Buna göre Denklem (2.5)'teki gibi bu oran,

$$VUF(\%)=\frac{V_-}{V_+}x100 \quad (2.5)$$

olarak formüle etmiştir. Burada ($V_-$) negatif sıra bileşenin genliğini, ($V_+$) pozitif sıra bileşenin genliğini ifade etmektedir.

### 2.1.5. Fliker

Gerilim sinyalindeki kırpışma olarak ifade edilen fliker, etkisini özellikle aydınlatma sisteminde göstermektedir. İnsanların ihtiyaç duydukları aydınlatmada konforu etkileyen bir olgu olduğu için elektriksel olarak kararlı halde tutulması önemlidir. Şebeke frekansı altındaki $\Delta V/V$ değişimleri olarak formüle edilir.

IEC 61000-4-15 standardında ilgili parametreyi iki farklı seviyede tanımlamıştır. Bunlar Kısa Dönem Fliker ($P_{st}$) ve Uzun Dönem Fliker ($P_{lt}$) olarak isimlendirilir. Normal çalışma koşullarında bir haftalık ölçüm süresince alınan onar dakikalık

ölçüm değerlerinin %95'i, Tablo 2.1'deki sınırlar dahilinde olmalıdır. 12 adet kısa dönem fliker ($P_{st}$), uzun dönem flikerı ($P_{lt}$) oluşturur.

Tablo 2.1. Fliker limitleri [12]

| Fliker Şiddeti Endeksi | Sınır Değerler |
|---|---|
| Pst | ≤ 1.0 |
| Plt | ≥ 0.8 |

### 2.1.6. Harmonik gerilimler

Sinüs olmayan gerilimler sebebiyle oluşan akımlarla hatlarda ve trafolarda ilave kayıplar ile birlikte diğer güç kalitesi problemleri de oluştuğu bilinmektedir [31].

Normal çalışma şartlarında bir haftalık ölçüm periyodu boyunca tüm harmonik gerilim değerlerinin onar dakikalık ortalamalarının %95'inin belirtilen Tablo 2.2'deki değerlere eşit veya daha az olmalıdır.

Tablo 2.2. Harmonik limitleri [12]

| Tek Harmonikler | | | | Çift Harmonikler | |
|---|---|---|---|---|---|
| 3'ün Katları Olmayan | | 3'ün Katları Olanlar | | | |
| Harmonik Sırası | Sınır Değer | Harmonik Sırası | Sınır Değer | Harmonik Sırası | Sınır Değer |
| h | % | h | % | h | % |
| 5 | %6 | 3 | %5 | 2 | %2 |
| 7 | %5 | 9 | %1,5 | 4 | %1 |
| 11 | %3,5 | 15 | %0,5 | 6…24 | %0,5 |
| 13 | %3 | 21 | %0,5 | | |
| 17 | %2 | | | | |
| 19 | %1,5 | | | | |
| 23 | %1,5 | | | | |
| 25 | %1,5 | | | | |

Ayrıca besleme geriliminin THD'si (40. dereceye kadar olan bütün harmonikler dâhil) %8'e eşit veya daha az olmalıdır.

Burada tüm harmonikler için izin verilen değerler, kullanıcının bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımının ($I_{SC}$), maksimum yük akımına ($I_L$) oranına göre belirlenir ve distorsiyon Denklem (2.6) ile Denklem (2.7)'deki şekilde hesaplanır;

$$THDI=\frac{\sqrt{I_2^2+I_3^2+\ldots+I_h^2}}{I_1} \quad (2.6)$$

$$TDDI=\frac{\sqrt{I_2^2+I_3^2+\ldots+I_h^2}}{I_L} \quad (2.7)$$

### 2.2. Ulusal OG Seviyede Sınır Değerler

Ülkemizdeki dağıtım şirketleri elektrik enerjisinin tedariki ve sürekliliğine ilişkin hizmetlerini "Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliğine" göre yürütürler. Yönetmeliğin üçüncü bölümü "Tedarik Sürekliliği Kalitesini" beşinci bölümü de "Teknik Kaliteyi" tanımlamaktadır.

#### 2.2.1. Tedarik sürekliliği değerleri

Tedarik sürekliliği kalitesi, dağıtım şirketinin sistem kullanıcılarına ekonomik olarak kabul edilebilir maliyetlerle ve mümkün olan asgari kesinti süresi ve sıklığı ile elektrik enerjisi sunabilme kapasitesi olarak tanımlanır.

Burada kesinti; nihai tüketiciye teslim noktasındaki gerilimin, bir veya birden fazla fazda nominal gerilim değerinin %5'inin altına düşmesi olarak tanımlanır.

Kesintiler ise Tablo 2.3'teki gibi sınıflandırılırlar.

Tablo 2.3.Kesinti sınıflandırması

| Kaynağına Göre | Süresine Göre | Sebebine Göre | Bildirim Durumu |
|---|---|---|---|
| İletim<br>Dağıtım OG<br>Dağıtım AG | Uzun<br>Kısa | Mücbir<br>Güvenlik<br>Dışsal<br>İşletmeci | Bildirimli<br>Bildirimsiz |

Süresine göre oluşan kesintiler aşağıda belirtilmiştir;

- Kısa kesinti: Bir saniyeden uzun ve üç dakikadan (dâhil) az süren kesinti,
- Uzun Kesinti: Üç dakikadan uzun süren kesinti,
- Geçici Kesinti: Bir saniye veya daha az süren kesinti, (Kayıt altına alınmaz)

Bunun sonucu elde kesintiler IEEE 1366 standardına göre belirlenen ortalama kesinti süresi endeksi (OKSÜRE, SAIDI) ve ortalama kesinti sıklığı endeksi (OKSIK, SAIFI) değerlerine göre dağıtım şirketi kullanıcılara tazminat ödemekle yükümlüdür ve aşağıdaki şekilde formüle edilir;

$$OKSIK=\frac{\sum_{i=1}^{n} U_i.t_i}{U_{top}} \tag{2.8}$$

Denklem (2.8)'de geçen ifadeler aşağıdaki gibidir.
n: Bir takvim yılında meydana gelen tüm uzun kesintilerin sayısı
$t_i$: i inci kesintinin süresi
$U_i$: i inci kesintiden etkilenen kullanıcı sayısı
$U_{top}$: Her bir takvim yılı başında dağıtım şirketi tarafından hizmet verilen toplam kullanıcı sayısıdır.

$$OKSIK=\frac{\sum_{i=1}^{n} U_i}{U_{top}} \tag{2.9}$$

Denklem (2.9)'daki formülde geçen ifadeler aşağıdaki gibidir.
n: Bir takvim yılında meydana gelen tüm uzun kesintilerin sayısı
$U_i$: i inci kesintiden etkilenen kullanıcı sayısı
$U_{top}$: her bir takvim yılı başında bir dağıtım şirketi tarafından hizmet verilen toplam kullanıcı sayısıdır.

Oluşan kesintiler için Tablo 2.4'teki sayı ve süreleri aşan kesintiler için dağıtım şirketi kullanıcılara tazminat ödemekle yükümlüdür.

Tablo 2.4. Kesinti sayı ve süreleri [12]

| Eşik Değer Adı | Kesinti Sınıfı | İmar Alanı İçindeki Kullanıcılar İçin | | İmar Alanı Dışındaki Kullanıcılar İçin | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | AG | OG | AG | OG |
| ESURE (Saat) | Bildirimsiz | 48 | 24 | 72 | 36 |
| ESAYI (Kez) | | 56 | 56 | 72 | 72 |
| ESURE (Saat) | Bildirimli | 24 | 16 | 32 | 24 |
| ESAYI (Kez) | | 6 | 4 | 8 | 6 |

### 2.2.2. Teknik kalite değerleri

Ulusal sistemde EPDK tarafından yayımlanan hizmet kalitesi yönetmeliğine göre teknik kalite ölçümü IEC 61000-4-30'e göre Class A sınıfı ölçü cihazlarıyla yapılarak EN 50160 standardında belirlendiği şekilde raporlanır. Bu standartlara göre istenen değerler Tablo 2.5'e uygun olmalıdır [32].

Tablo 2.5. Teknik kalite sınır değerleri

| Güç Kalitesi Parametresi | Kabul Edilebilir Sınır Değerler | Ölçüm Aralığı | İzleme Periyodu | Kabul Seviyesi |
|---|---|---|---|---|
| Etkin gerilim değeri (AG) | ±%10 | 10 dk. | 1 hafta | %95 |
| Etkin gerilim değeri (AG) | -%15 ila +%10 | 10 dk. | 1 hafta | %100 |
| Gerilim dengesizliği (AG) | %3 | 10 dk. | 1 hafta | %95 |
| Gerilim dengesizliği (AG) | %2 | 10 dk. | 1 hafta | %95 |
| Toplam harmonik bozulma (THB) | %8 | 10 dk. | 1 hafta | %95 |
| Harmonik gerilimler | EN50160 harmonik tablosuna göre (Tablo 2.2) | 10 dk. | 1 hafta | %95 |
| Uzun süreli kırpışma ($P_{lt}$) | ≤1 | 2 saat | 1 hafta | %95 |
| Gerilim çökmesi | | 10 ms | Tüm izleme periyodu | - |

Burada IEC 61000-4-30 standardı güç kalitesinin ölçüm yöntemini ve güç kalitesine etki eden bileşenlerini, EN 50160 ise farklı güç kalitesi parametreleri için önerilen değerleri ve bu değerler için uyulması gereken sürelerin yüzdeliğini belirlemektedir. 1 hafta süre ile kaydedilen 10ar dakikalık ölçümlerin ortalamasının %95'inin uygun olmasını belirtmektedir [13].

Bu değerler, gerilim karakteristikleri yönünden EN 50160 standardını, harmonikler için IEEE 519-2014 standardını ve fliker etkisi yönünden de IEEE 1453-2015 standardını referans almaktadır. Ayrıca dünyada referans alınan diğer bir güç kalitesi izleme standardı ise IEEE 1159 dur.

EN 50160 standardı alçak ve orta gerilim şebekelerinde gerilim karakteri üzerine yoğunlaşırken IEEE 1159 standardı gerilim değeri üzerinde böyle bir sınırlama olmayacağını ifade etmektedir [14]. Anlık gerilim bozulmaları ise IEEE 1250 standardında sınıflandırılmıştır. Gerilim değerleri açısından ilgili standartlarda bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bu değerleri için Tablo 2.6'da IEEE 1159 ile EN 50160 arasındaki gerilim değerleri açısından karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 2.6. IEEE 1159 ile EN 50160 karşılaştırması

| Standart | | IEEE 1159 | | | EN 50160 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kesinti Sınıfı | | | Olay Değeri | Olay Süresi | | Olay Değeri | Olay Süresi |
| Geçici Rejimler (Transient) | | Darbe (İmpulse) | - | 5 ns - 10 ms | Transient Aşırı Gerilim | >1.1 pu | <10 ms |
| | | Osilasyon | 0-8 pu | 3 µs - 5ms | | | |
| Kısa Süreli Olay | Ani Değişim | Sag | 0.1-0.9 pu | 10 ms-500 ms | Geçici Aşırı Gerilim | >1.1 pu | 10 ms-3 dk |
| | | Swell | 1.1-1.8 pu | 10 ms-500 ms | | | |
| | Anlık Durum | Kesinti | <0.1 pu | 10 ms-3 sn. | Kısa Kesinti | <0.01 pu | 10 ms-3 dk |
| | | Sag | 0.1-0.9 pu | 500 ms-3 sn. | | | |
| | | Swell | 1.1-1.4 pu | 500 ms-3 sn. | | | |
| | Geçici Durum | Kesinti | <0.1 pu | 3 sn-1 dk. | | | |
| | | Sag | 0.1-0.9 pu | 3 sn-1 dk. | | | |
| | | Swell | 1.1-1.2 pu | 3 sn-1 dk. | | | |
| Uzun Süreli Olay | | Kesinti | 0.0 pu | >1 dk | Uzun Kesinti | <0.05 pu | >3 dk |
| | | Düşük Gerilim | 0.8-0.9 pu | >1 dk | Gerilim Düşmesi | 0.05-0.9 pu | 10 dk |
| | | Aşırı Gerilim | 1.1-1.2 pu | >1 dk | Aşırı Gerilim | >1.1 pu | 10 dk |

Bunun yanı sıra uluslararasında aşağıdaki Tablo 2.7'de bulunan güç kalitesi standartlarına da yer verilmektedir.

Tablo 2.7. Uluslararası güç kalitesi uygulama örnekleri

| Periyot | Süre | Limit | Ülke (Gerilim Seviyesi) |
|---|---|---|---|
| 10 dk. | %95 | ±%7,5 Un | Macaristan (AG) |
| 10 dk. | %100 | ±%10 Un | Macaristan (AG)<br>İsveç (AG, OG, YG) |
| 1 dk. | %100 | +%15 /-%20 Un | Macaristan (AG) |
| 10 dk. | %95 | ±%5 Un | Portekiz (YG) |
| 10 dk. | %95 | ±%7 Un | İspanya (OG, YG) |
| 1 dk. | %100 | ±%10 Un | Norveç (OG) |
| 10 dk. | %95 | ±%10 Un | Hollanda (OG) |
| 10 dk. | %100 | +%10 /-%15 Un | Hollanda (OG) |
| 10 dk. | %99,9 | ±%10 Un | Hollanda (OG) |
| 10 dk. | %95 | +6% /-%10 Un | İtalya (AG) |
| 10 dk. | %95 | ±%10 Un | Türkiye (AG) |
| 10 dk. | %100 | +%10 /-%15 Un | Türkiye (AG) |
| 10 dk. | %99 | ±%10 Un | Türkiye (OG) |
| 10 dk. | %100 | ±%15 Un | Türkiye (OG) |

Bunun yanı sıra uluslararasında aşağıdaki güç kalitesi standartlarına yer verilmektedir.

- ANSI C84.1 Güç sistemleri ve ekipmanları için standart gerilim değerleri.
- IEC 60038 Gerilim standartları.
- IEC 61000 Elektromanyetik uyumluluk.
- IEC 61000-3-2 Harmonik akım limitleri (16 A den küçük sistemler için).
- IEC 61000-4-7 Enerji besleme sistemlerinde ve bunlara bağlı cihazlardaki harmonik ve ara harmoniklerin ölçmeleri ve ölçme cihazı için genel kılavuz.
- IEC 61000-4-15 Kırpışma ölçer - Fonksiyon ve tasarım özellikleri.
- IEC 61000-4-30 Güç kalitesini ölçme metotları.
- IEEE 519 Elektrik güç sistemlerinde harmonik kontrol için önerilen yöntem ve gereksinimler.
- IEEE 1100 Elektronik ekipmanların enerjilendirme ve topraklama yöntemleri.
- IEEE 1159 Elektrik güç kalitesi izleme yöntemleri.
- IEEE 1250 Güç sistemlerinde gerilim kalitesini belirleme ve geliştirme rehberi.
- IEEE 1346 Elektronik işletme ekipmanlarının güç sistemlerine uyumluluğunu değerlendirme yöntemleri.
- IEEE 1433 Standart güç kalitesi terminolojisi sözlüğü.
- IEEE 1453 AC Güç sistemlerinde gerilim dalgalanmalarına bağlı olarak fliker etkisinin ölçülmesi ve sınırlandırılması için önerilen yöntemler.
- IEEE 1531 Harmonik filtreler için sınıflandırma ve uygulama rehberi.
- IEEE 1564 Gerilim düşümü endeksleri.
- IEEE C2 Amerikan ulusal elektrik güvenliği yasası.
- IEEE C62.41 Alçak gerilim AC güç sistemlerinde darbe gerilimleri için önerilen yöntemler.
- NEMA LA 1 Parafudrlar.
- NEMA LS 1 Alçak gerilim yıldırımdan korunma araçları.
- NEMA PE1 Kesintisiz güç sistemleri.
- NFPA 70 Amerikan ulusal elektrik kanunları.
- NFPA 780 Amerikan yıldırımdan korunma yönetmeliği.
- UL96A Yıldırımdan korunma sistem teçhizatı için güvenlik standard.
- UL1283 Elektromanyetik girişim filtreleri için güvenlik.
- UL1449 Aşırı gerilim den koruma cihazları.

# 3. GERİLİM REGÜLASYONU

İdeal bir elektrik şebekesi hattı üzerindeki tüm yükler kesintisiz ve sabit gerilimde beslenmelidir. Ancak gerilimleri hat boyunca sabit tutmak pratikte oldukça zordur. Çünkü üzerinden akım geçen trafolar, kablolar ve iletkenler gibi elemanlardaki kayıplar sebebiyle hat boyunca gerilim düşümleri oluşmaktadır.

Elektrikle çalışan tüm cihazlar belirli bir gerilim aralığında çalışmak üzere tasarlandığından, aşırı veya düşük gerilimde çalıştıklarında performansları düşmekte, ömürleri kısalmakta, hatta zarar görerek arıza yapmaktadırlar. İlaveten birçok ekipman, gerilim düşümünde daha düşük güç faktöründe çalışma ihtiyacı duymaktadır. Bu da şebekeden daha fazla akım çekilmesi ile hat ve transformatörlerin daha fazla ısınmasına sebep olurken malzeme ömürlerinin de kısalmasına sebebiyet vermektedir [20].

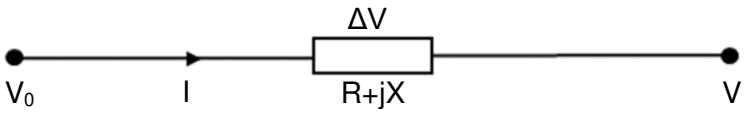
Gerilim regülasyonunu, gerilim düşümü ve gerilim yükselmesi olarak iki başlıkta ayrı ayrı inceleyebiliriz.

## 3.1. Gerilim Düşümü

Dağıtım şirketleri için gerilim düşümünün önemi büyüktür. Dağıtım şirketleri tüketici veya müşterilerine kesintisiz enerji garantisi verilirken, kullanıcı bağlantı noktasındaki gerilim düşümü değerini de minimum düzeyde tutulmalıdır. Bununla birlikte elektrik dağıtım şirketleri, EN 50160 standardında ve “Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliğindeki” gerilim kriterleri için verilen şartlarının tamamını yerine getirmekle yükümlüdür. Bunun için dağıtım şirketleri gerilim düşümlerinin çok olduğu, yük yoğunluğunun fazla olduğu veya radyal olarak tasarlanmış kırsal kesimdeki uzun fiderlerde gerekli tedbirleri almak zorundadırlar.

Bu durumda genellikle ana besleyici trafolardan kademe ayarı yaparak veya ilgili tüketicilerin beslendiği hat üzerinde faz dengelemesi yaparak gerilimi düzenlemeye çalışılsa da çözümlerin yetersiz kaldığı durumlarda yeni yatırım yapma ihtiyacı doğmaktadır. İlgili bu problemi en uygun ve ekonomik bir şekilde çözmek için problemi iyi tanımamız gerekmektedir.

Gerilim düşümünün oluşumunu Şekil 3.1'deki basit hat modeli ile ifade edebiliriz [8].




Şekil 3.1. Basit hat modeli

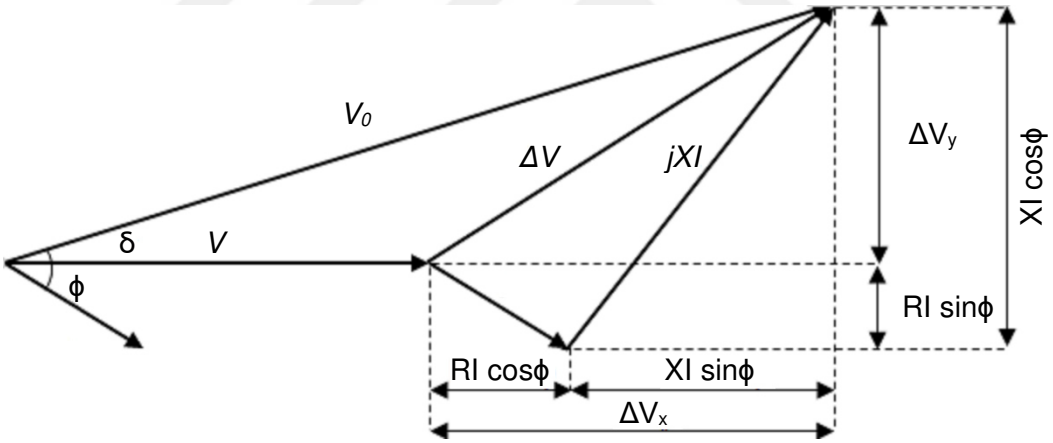
Tüketiciler için gerilim seviyesinin kontrolünde sistemin her bir hattındaki gerilim düşümü (ΔV) Denklem (3.1)'deki gibi hesaba katılmalıdır.

$$\Delta V=RI+jXI \tag{3.1}$$

$$V=V_0-\Delta V \tag{3.2}$$

$$V=V_0-(RI+jXI) \tag{3.3}$$

Birim uzunluktaki hattın uç gerilimi Denklem (3.2)'deki gibi bulunabilir. Denklem (3.3)'te gösterilen eşitlik fazör diyagramı üzerinde Şekil 3.2'deki gibi gösterilir.




Şekil 3.2. Hat sonu gerilimi fazör diyagramı

d boyundaki hatta oluşan gerilim düşümü Denklem (3.4) ila (3.8)'deki gibi bulunur.

$$\Delta V= d(RI+jXI) \tag{3.4}$$

$$\Delta V= d(\Delta V_x+j\Delta V_y) \tag{3.5}$$

$$\Delta V_x=d(RI\cos\phi+XI\sin\phi) \tag{3.6}$$

$$\Delta V_y=d(XI\cos\phi I-RI\sin\phi I) \tag{3.7}$$

$$\Delta V=d[(RI\cos\phi+XI\sin\phi) +j(XI\cos\phi-RI\sin\phi)] \tag{3.8}$$

Şekil 3.2'deki fazör diyagramından da anlaşılabileceği gibi hat sonu gerilimi vektörel olarak ΔV kadar farklıdır.

Tüm dağıtım sistemleri, kaynak ve son kullanıcı arasında gerilim farkını ortaya çıkaran bir empedans değerine sahiptir. Bu empedans değeri kaynak ile yük arasındaki seri akım yolu üzerindeki tüm hat, kablo ve transformatör gibi elemanların oluşturdukları empedansların eşdeğeridir.

Yıllar içinde hat kayıplarını minimize etmek için farklı çözüm yöntemleri ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri tek fazlı sistem yerine üç fazlı sisteme geçilmesidir. Simetrik üç fazlı sistem kullanımı tek fazlı sistemle karşılaştırıldığında kayıpları altı kat azaltmaktadır [15].

Bunu örnek olarak aşağıdaki Denklem (3.9) ve (3.10)'daki gibi ifade edebiliriz.

Bir fazlı sistemde hat kaybı;

$$P_{L1} = I^2(2R) = 2I^2R \tag{3.9}$$

Üç fazlı sistemde hat kaybı;

$$P_{L3} = \left(\frac{I}{3}\right)^2 x3R = \frac{I^2R}{3} = \frac{1}{6}P_{L1} \tag{3.10}$$

Bir diğer çözüm de aynı gücü iletirken gerilim seviyesini yükseltmektir fakat unutulmamalıdır ki gerilim seviyesi yükseldiğinde sağlıklı bir yalıtım sağlamak zorlaşmaktadır [15].

Gerilim düşümü için genel olarak aşağıdaki;
- Dinamik gerilim yenileyici
- Aktif seri kompansatör
- Statik kompansatör (STATCOM)
- Solid-state (Katı hal) yönlendirme anahtarı (SSTS)
- Sabit UPS ile enerji depolama
- Yedek besleme sistemleri (BSES)
- Ferro-rezonans transformatörü
- Motor jeneratör setleri
- Sabit VAR kompansatör (SVC)

gibi yöntemler kullanılabilmektedir [38].

### 3.2. Gerilim Aşımı

Geleneksel elektrik sistemlerinde enerji, merkezi bir noktada ve oldukça büyük santraller tarafından üretilip kullanıcıya iletilecek şekilde dizayn edildiğinden bahsetmiştik. Bu sistemler için güç akışı tek yönlü olup kaynaktan uzaklaştıkça gerilim düşümü ile etkisini göstermektedir. Fakat günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması için gerekli teşviklerin yapılması ile sisteme güneş, rüzgâr, jeotermal, katı atık yakıtlı santraller gibi göreceli olarak daha düşük güçlü fakat şebeke içerisine dağınık bir şekilde bağlı olan santrallerin girdiğini görmekteyiz. Bu santraller dağıtık üretim santralleri olarak isimlendirilmektedir.

Genel olarak dağıtık üretim santralleri, enerji kaynağının bulunduğu yer sebebiyle yerleşim yerlerinden uzakta kurulmaktadır. Bu noktalarda zayıf olarak nitelendirebileceğimiz şebeke yapısına bağlanması sebebiyle sistemin işlemesinde problemler oluşturabilmektedir. Öncelikle sistemde yük yoğunluğunun fazla olduğu ya da uzun hatların bulunduğu kırsal şebekelerde, hat sonundaki tüketicilerde oluşan gerilim düşümünü telafi etmesi ve hatlar üzerindeki kayıpların azaltılması öngörülse de yük yoğunluğunun azalması durumunda bu noktalarda aşırı gerilim yükselmelerine sebep olabilmektedir [21].

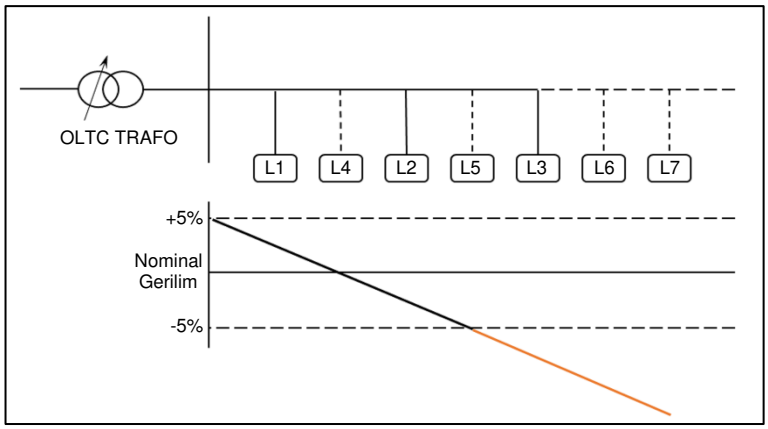
Bu sistemlerin birçok faydasının yanı sıra bağlandığı barada gerilim yükselmelerine sebebiyet vermektedir. Gerilim yükselmesinin sebebi ise dağıtık üretimin bağlı olduğu noktadan sisteme ters güç akışı olmasından kaynaklanır. Özellikle güç yoğunluğu düşük bölgelerde santral ürettiği enerjiyi uzak mesafelere iletme ihtiyacı olduğunda, bağlandığı barada gerilimi yükseltir. Bu sebeple ülkemizde de yaygınlaşan dağıtık üretim sistemlerinin şebekeye entegre olmasıyla şebeke üzerinde yaşanan sıkıntılar da artmaktadır.

Görüldüğü gibi sistemlerde çeşitli sebeplerden ötürü gerilim değişimleri söz konusu olmaktadır. Sistemin verimli bir şekilde işlemesi için gerilim regülasyonunun önemi burada kendini göstermektedir.

### 3.3. Gerilim Regülasyonu Çözümleri

Şebekede hat mesafesi arttıkça veya ilave yüklerin etkisiyle gerilim düşümü olduğu bilinmektedir. Bu durumda ilgili noktaya yeni bir şebeke yatırımı söz konusu değil ise elektriğin kalitesini arttırmak için gerilim regülasyonuna ihtiyaç vardır.

Bazı durumlarda bu gerilim düşümü Şekil 3.3'teki gibi istenilen değerlerin dışına çıkabilmektedir.




Şekil 3.3. Gerilim düşümü grafiği

Bunun için yapılacak olan gerilim regülasyonunun da çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunları aşağıdaki şekilde sınıflandırılabiliriz.

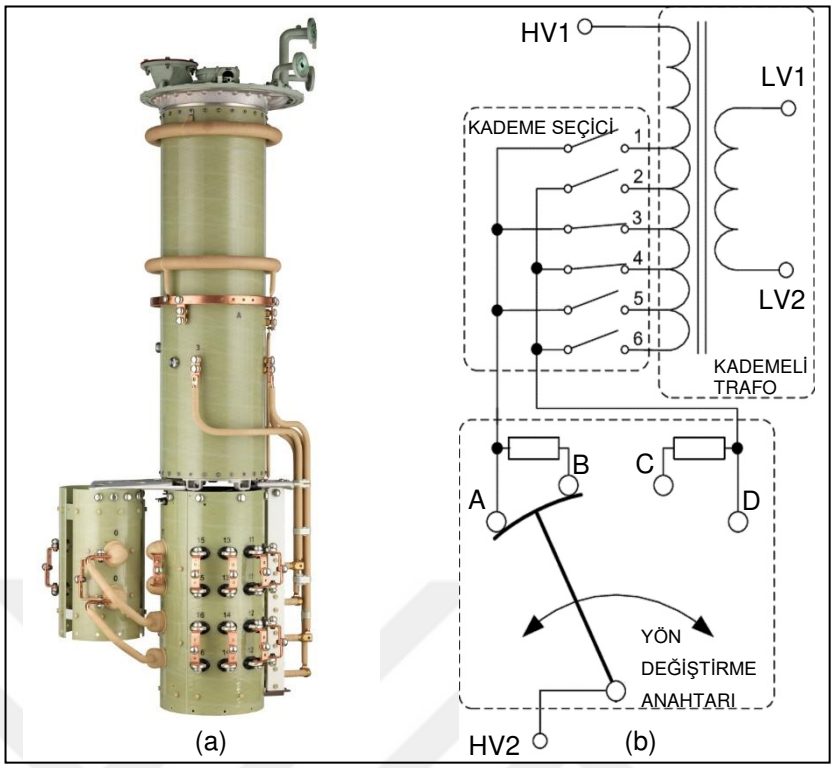
- Boşta kademe değiştiricili transformatör (Off-Load Tap Changer)
- Yükte kademe değiştirici transformatör (On-Load Tap Changer)
- Şönt kapasitör ve reaktör
- Oto trafo
- İndüksiyon regülatör
- Otomatik gerilim regülatörü (Step voltage regulator)

### 3.3.1. Boşta kademe değiştirici

Dağıtım sistemindeki OG/AG trafolarının bünyesinde bulunan standart mekanik kademe değiştiricilerdir. Bunlar dağıtım şirketinin malzeme şartnamesinde belirtilerek tüm trafo üreticileri tarafından standart 5 veya 6 kademeli olarak imal edilirler. Boşta olarak isimlendirilmesi, ancak trafonun enerjisiz durumunda kademe değişime imkân verdiği içindir. Şebeke işletmecisinin denetiminde trafonun OG tarafından, AG gerilim değerini manuel olarak ayarlaması için kullanılır.

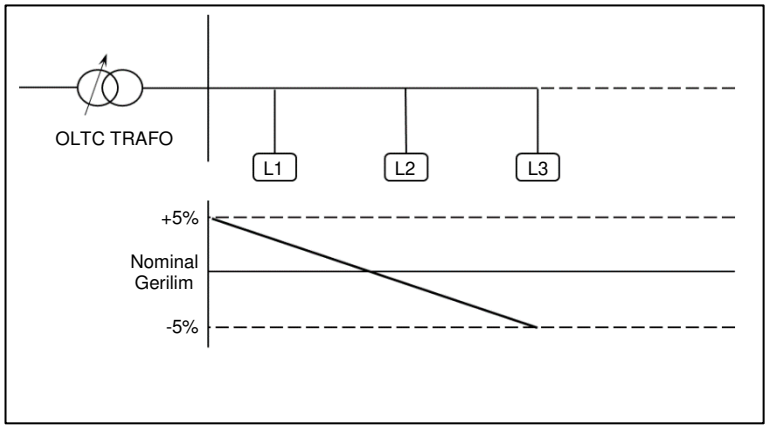
### 3.3.2. Yükte kademe değiştirici (OLTC)

On-load tap changer (OLTC) olarak isimlendirilen gerilim kontrolü elemanları, YG/OG veya OG/OG güç trafoların yapısında bulunan Şekil 3.4'teki gibi bir ekipmandır. Trafo kademe sargıları arasında otomatik olarak kademe değişimi yapmak için kullanılmaktadırlar. Kontrolü operatör tarafından uzaktan yapılmaktadır.




Şekil 3.4. a) Yükte kademe değiştirici ve b) prensip şeması

Yüksek gerilim güç trafoları normal işletme koşullarında tam yük altında nominal şebeke gerilimini verecek şekilde ayarlanır ve şebeke işletmecisinin talebi doğrultusunda gerekli düzenlemeler yapılarak Şekil 3.5'teki gibi uygun sınırlar içerisinde kalması sağlanır.

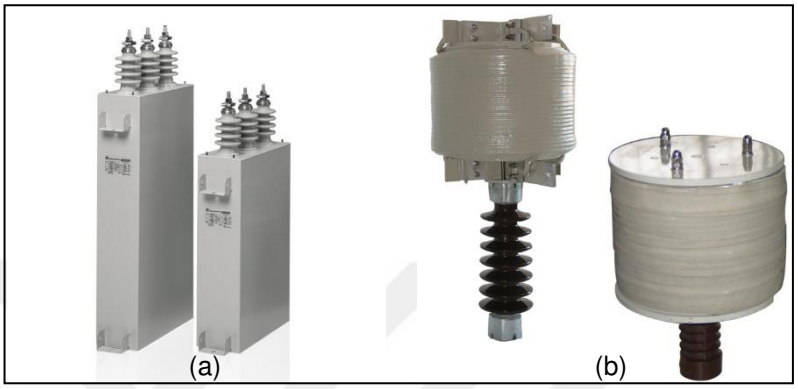



Şekil 3.5. Sabit ayarlanmış gerilim grafiği

Fakat bu düzenleme her gerilim dalgalanmasında yapılacak bir iş değildir çünkü kademe ayarlaması sonucu trafoya bağlı tüm alt trafolarda gerekli izleme ve kontrol işlemleri yapılması gerekmektedir. Diğer bir husus ta istatiksel olarak güç trafolarının en çok arıza yapan donanımı otomatik kademe değiştiricilerdir.

### 3.3.3. Şönt kapasitör ve reaktör

Klasik şebeke işletmeciliğinde diğer bir yöntem ise şebeke geriliminin reaktif güç ile ilişkisinden ortaya çıkan hat kayıplarını minimize etmektir. Bu doğrultuda kontrol için dağıtım şebekesindeki hatların belirlenen düğüm noktalarına Şekil 3.6'da bulunan OG kapasitör bankları veya reaktörler eklenir [16].

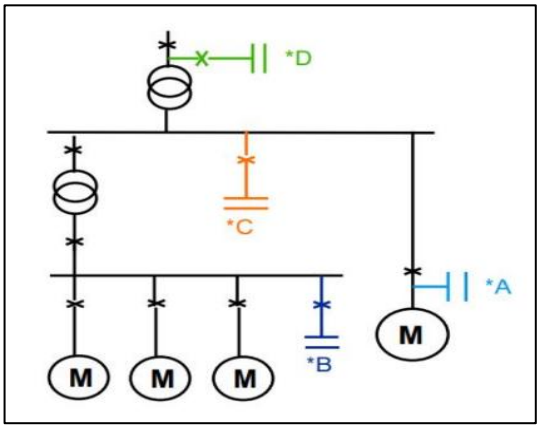



Şekil 3.6. OG a) kapasitör ve b) reaktör

Volt-Var kontrolü olarak da isimlendirilen bu yöntemde, verimli bir şekilde kompanzasyon yapabilmek için özellikle kapasitör yerleşiminde optimum lokasyonun bulunması gerekmektedir.

Fakat bu yöntem de gerilim regülasyonu ayarlanabilir bir durumda değildir. Tamamen bölgenin yük profiline ve şebeke işletmecisinin gözlemlerine dayanarak yapılan bir gerilim takviyesi yöntemidir. Ayrıca bu kontrol yönteminde sistemin işletilmesi için gerekli olan reaktif dengeyi bozmamak gerekmektedir.

Şekil 3.7'de klasik bir şebeke için düzenlenmiş kapasitör yerleştirme noktaları görülmektedir. Bu noktalar fider başlangıcı veya son kullanıcıda olabilirler.

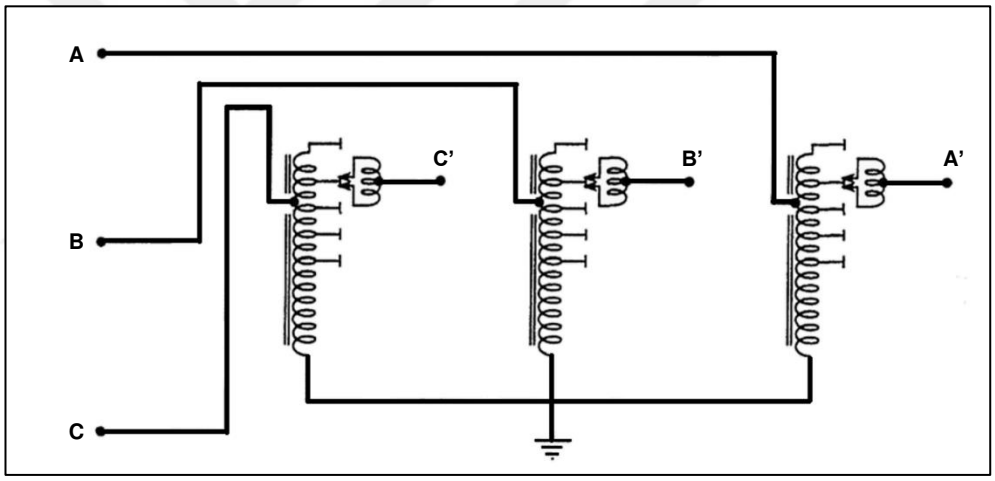



Şekil 3.7. Optimum kapasitör yerleştirme

Bu en basit yöntem ile Volt-Var kontrolü sağlamaktadır. Sistemlerde reaktif gücü daha etkin kontrol etmek ve gerilim regülasyonuna destek vermesi amacıyla SVC veya STATCOM gibi teknolojiler ile çözüm bulunabilmektedir. Fakat bu çözümlerin maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3.3.4. Oto trafo

Diğer bir yöntem oto transformatörleri ile istenilen noktada gerilim regülasyonu yapılmasıdır. Oto trafoları normal güç trafolarından farklı olarak primer ve sekonder sargıları Şekil 3.8'deki gibi birbirine seri olarak bağlı tek sargıdan oluşan trafolardır. Sargılar aynı nüve üzerinde ve aynı manyetik alan etkisinde kalmaktadır. En büyük avantajı daha küçük boyutlu yapıları ile aynı gücü elde edebilirler. Böylelikle daha az bakır ve saç kullanılarak imal edilirler. Bu sayede kayıpları ve maliyetleri daha düşük olur. Ayrıca daha kararlı gerilim regülasyonu sağlayabilmektedir.




Şekil 3.8. Oto trafo sargıları

Oto trafoları özellikle çok uçlu olarak imal edilmek suretiyle çok fazla gerilim kademe seçeneğine imkân verir. Böylelikle istenilen değerde gerilim ayarlaması yapılabilir.

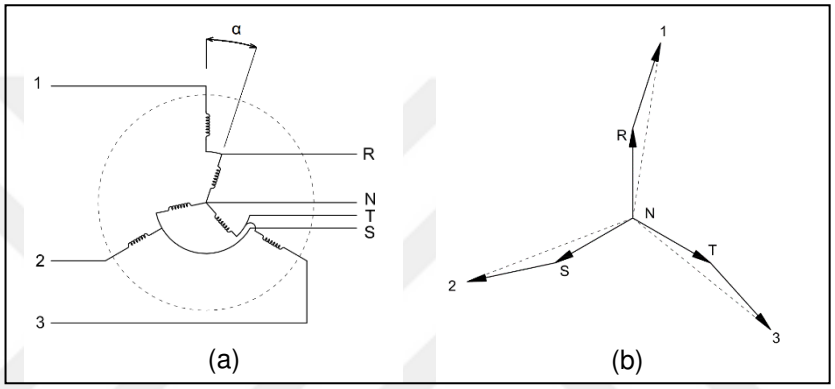
Bunlara ilaveten gerilim yükseltmede, enerji iletim ve dağıtım sisteminde hatlardaki gerilim düşümünü karşılamak için ayrıca yüksek güçlü motorlara yol verme amaçlı olarak ta kullanılır.

İlaveten enterkonnekte sistemde çok yüksek gerilim seviyesine sahip 154 kV ve 380 kV hatlardaki indirici merkezlerde oto trafo ile gerilim transformasyonu yapılır. Gerilim regülasyonu için uzaktan kontrollü manuel kademe değiştirici (tap-changer) ile gerilim ayarı yapılabilmektedir.

### 3.3.5. İndüksiyon regülatör

Farklı bir yöntem olarak ta bu tip gerilim regülatörlerine örnek verilebilir. Genel yapısı itibarıyla geleneksel oto trafonun, yük akımı etkisiyle olarak primer ve sekonder sargılarının bulunduğu nüve arasında açısal faz farkı oluşturarak indüklenen gerilimlerin vektörel toplamı ile genlik değişimine dayanan bir çalışma prensibi vardır.

İndüksiyon regülatörde hareketli bir seri sargı vardır. Bu sargı manuel veya motor ile döndürülerek sargılar arasında Şekil 3.9'daki gibi bir açı farkı oluşması sağlanır.




Şekil 3.9. İndüksiyon regülatör a) prensip şeması ve b) fazörü

Böylelikle faz gerilimlerinin vektörel olarak toplamı ile gerilim ayarı yapılması hedeflenmektedir. Şekil 3.10'da indüksiyon regülatörünün yapısı görülmektedir

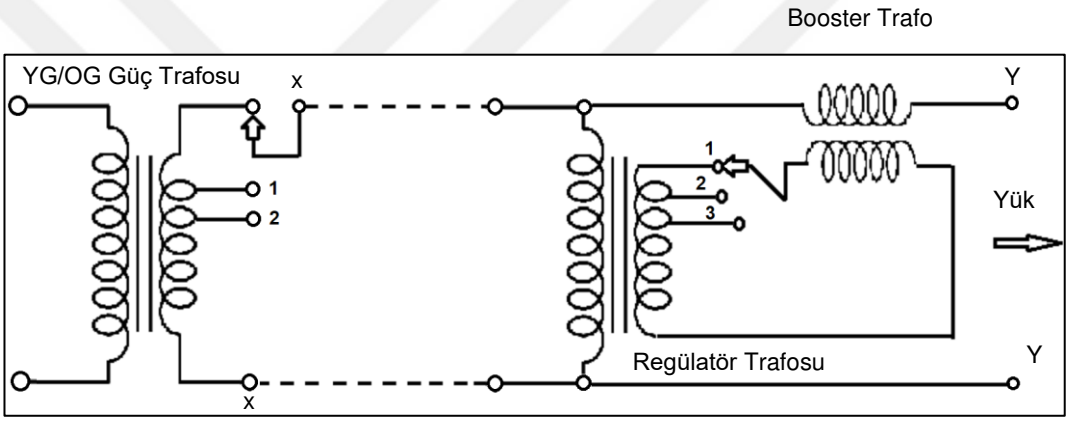


Şekil 3.10. İndüksiyon regülatör

Bu tip regülatörler bireysel olarak kullanımda uygundur. Fakat şebekede paralel çalışma durumu olan yerlerde açısal farktan dolayı problem oluşturabilmektedir [22].

### 3.3.6. Otomatik gerilim regülatörü (Step voltage regulator)

Son olarak ta uygulamasını anlattığımız otomatik gerilim regülatörü bulunmaktadır. Genel yapı itibarıyla Şekil 3.11'deki gibi hatta biri paralel (primer) biri de seri (sekonder) bağlı sargıdan oluşan ve giriş gerilim değerine göre tümleşik kontrol elemanları ile primer/sekonder dönüştürme oranlarını değiştirerek şebekeye sağlayacağı gerilim desteğinin kontrol edilmesi yöntemi ile gerilim regülasyonu sağlayacak şekilde tasarlanan bir trafodur. Böylelikle istenilen nominal gerilim değerinin, izin verilen değerler içinde kalacak şekilde kontrol edebilecek gerekli yerlere tesis edilir.




Şekil 3.11. Booster trafo yapısı

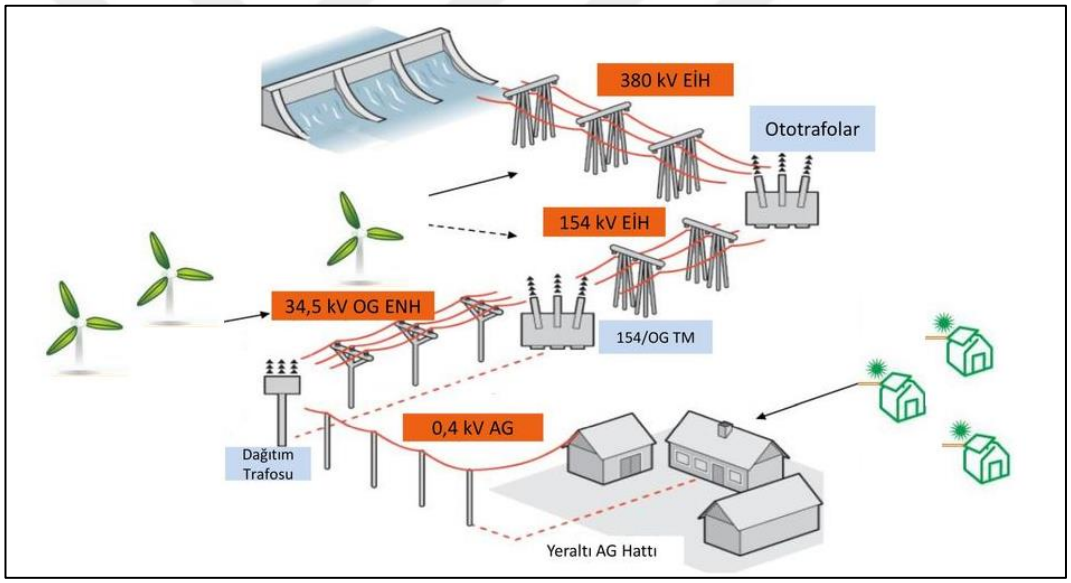
### 3.4. Gerilim Dengesizliği Çözümleri

Dağıtım sisteminde teknik kalite problemlerinden biri de gerilim dengesizliği olduğu bilinmektedir. Gerilim dengesizliğinde, yüklerin durumuna bağlı olarak fazların genlikleri arasındaki gerilim farkı EN 50160'a göre %2 olmalıdır. Bu oran tek fazlı yüklerin çok olduğu yerlerde ise en fazla %3'e kadar izin verilmektedir.

Bu kalite probleminin düzeltilmesi kapsamda gerilim regülatörünün yeteneği çok etkilidir. Özellikle regülatörün her fazı ayrı ayrı düzenlemesi sebebiyle gerilim dengesizliği problemini ortadan kaldırmaktadır. Bu da regülatörün oto transformatörüne karşı en büyük avantajını oluşturmaktadır.

## 4. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖRLERİ (SVR)

Dünyada gerilim regülatörlerinin dağıtım sistemlerinde kullanılmaya başlaması 1940'lı yıllara dayanmaktadır. Büyük coğrafyası ve tüketicilerin üretim santrallerinden oldukça uzakta olması sebebiyle böyle bir donanım ihtiyacı doğduğundan regülatörleri geliştiren ülkelerin başında Amerika gelmektedir. Böylelikle enerji dağıtım sisteminde daha kaliteli bir hizmet sunulmaya başlamıştır. Bunlara ilaveten müşteri memnuniyeti, enerji kayıplarının azalması ve dağıtım şirketlerinin kazanç elde etmesine olanak sağlamıştır. Bu sebeple günümüzde birçok ülkede gerilim regülatörleri kullanılmaktadır [17].

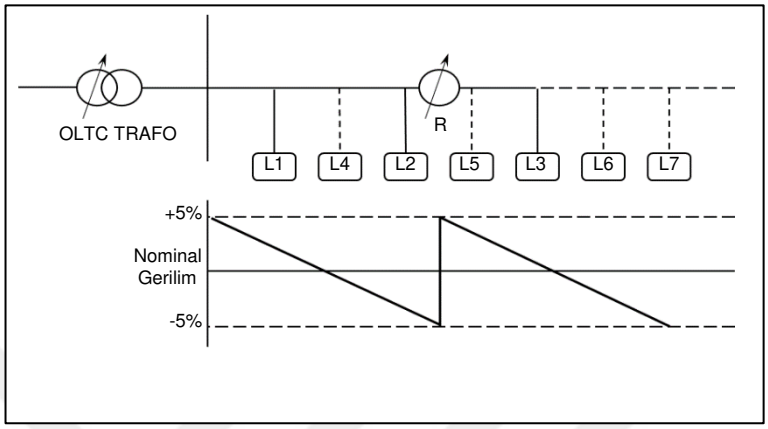



Şekil 4.1. Şebeke genel yapısı

Şekil 4.1'de gelişen teknolojiler ile modernleşen dünyamızda enerji iletim ve dağıtım sisteminin genel yapısı bulunmaktadır. Görüldüğü gibi günümüzde klasik üretimden tüketime doğru tek yönlü bir akış değil, dağıtık üretimin entegrasyonu ile değişik zaman dilimlerinde farklı enerji akış yönlerinin olduğu daha karmaşık bir işletme sistemi oluşmaktadır [37]. Bu yapıdaki bir şebekeyi sağlıklı bir şekilde yönetmek ve işletebilmek adına her noktada gerilim değerini sabit tutmak yani gerilimi regüle etmek oldukça önem arz etmektedir.

OG gerilim regülatörleri prensip olarak oto transformatörlerine benzemektedir. En temel farkı oto trafoda otomatik kademe ile üç faz aynı anda ayarlanırken gerilim

regülatörünün her fazı ayrı ayrı kontrol edebilmesidir. Regülatörün avantajı her faza ayrı ayrı bağlandığı için sadece regülasyon problemi olan fazı ayarlayarak gerilim düzenleme ve dengeleme işlemi yapmasıdır. Böylece yük çıkışındaki gerilim değeri Şekil 4.2 deki gibi istenilen ayar bölgesinde kalması sağlanmış olacaktır.




Şekil 4.2. SVR ile gerilim regülasyonu

OG gerilim regülatörleri 36 kV OG seviyesine kadar kullanılabilen yük akımı, hat kayıpları veya dağıtık üretimin etkisiyle oluşan gerilim değişimlerini sabit tutabilmek amacıyla hatta bağlanan, seri ve paralel sargıları sayesinde çıkışında gerilim regülasyonu yapması için tasarlanmış Şekil 4.3'teki gibi elektrik makinalarıdır.



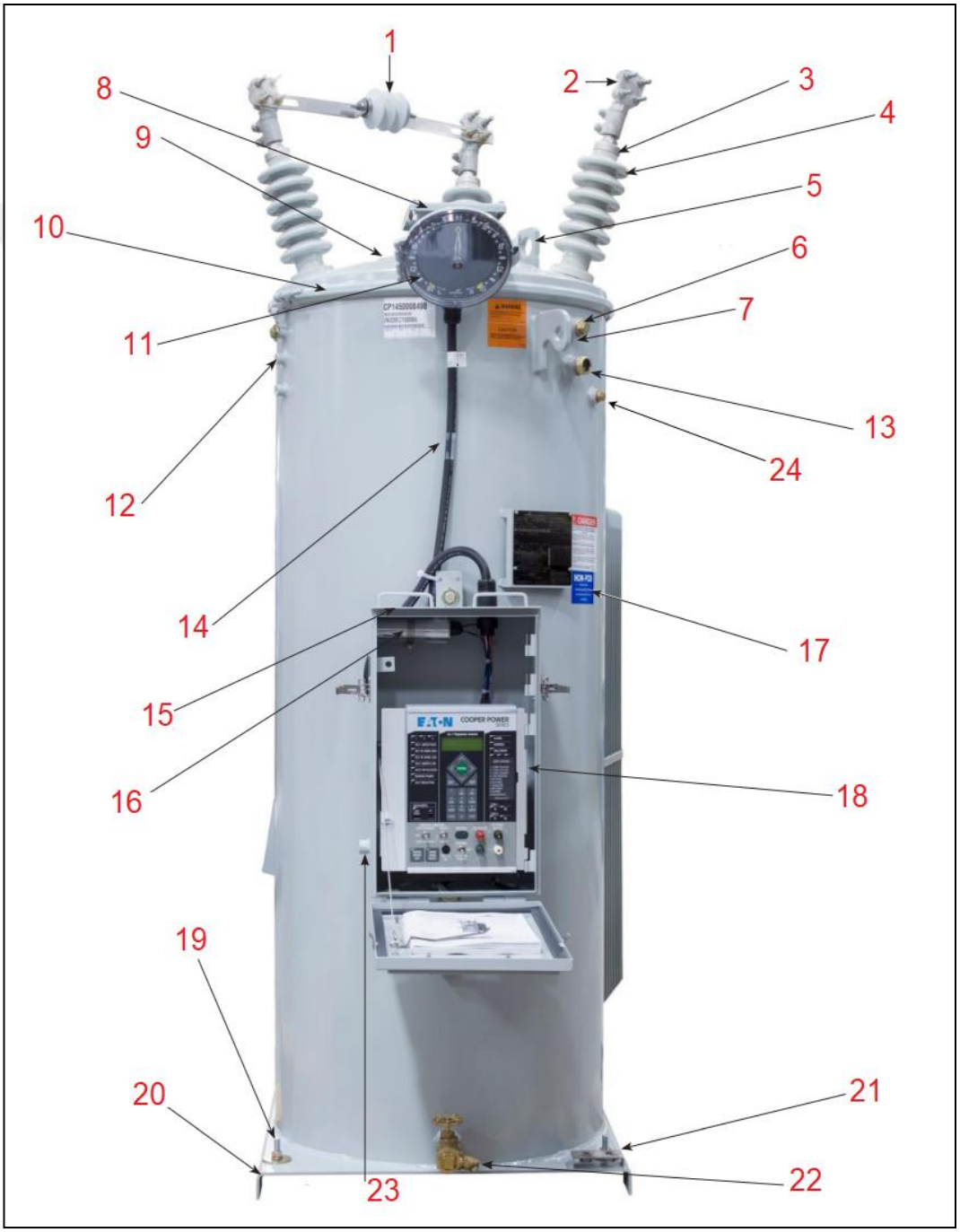
Şekil 4.3. Regülatör bankı

Yapısal olarak çıkıştan aldığı referans gerilime göre gerekli denetim mekanizmalarını işleterek, hatta seri bağlı sargılar ile gerilimi azaltma veya yükseltme işlemi yapacak şekilde tasarlanmıştır. Genellikle tek fazlı olarak üretilen regülatörler, ihtiyaç noktasına göre 2 veya 3 tanesi birlikte kullanılarak oluşturulan ve bank ismi verilen yapı halinde kullanılmaktadırlar. Bunun yanı sıra 3 fazın tek kabine

monteli (Pad-Mounted) ve tek kontrol panelli yapıda bulunan modelleri de bulunmaktadır.

### 4.1. Genel Yapısı

Örnek bir model tek fazlı orta gerilim seviyesinde kullanılan gerilim regülatörünün genel görünüşü Şekil 4.4'te görülmektedir.




Şekil 4.4. EATON (Cooper) tek fazlı gerilim regülatörü yapısı [33]

1) Metal oksit varistör tipi seri parafudr: Seri sargıyı maruz kalabileceği aşırı gerilim darbelerinden korur.
2) Buşing bağlantı klemensleri: Yüksek akım kapasiteli kolay bağlantı imkanı sağlayan bağlantı elemanlarıdır.
3) Vidalı buşing terminalleri: Kolay konnektör değişim imkânı sağlayan buşingler.
4) Yüksek krepajlı buşingler: Daha ileri seviye bir koruma, yüksek krepajlı buşingler ile sağlanmaktadır. Bu 3 buşing de birbirinin aynısıdır.
5) İçten monteli kaldırma halkası: Cihazın tüm iç aksamı, bu kaldırma halkası vasıtası ile çıkartılabilmektedir.
6) Yağ tasfiye cihazı bağlantı noktası: Bu noktadan izolasyon yağı ilave etmek için tasfiye cihazının hortum bağlantısı yapılabilmektedir.
7) Kaldırma kulakları: Bu kulaklar, tüm ünitenin kaldırılmasında ve taşıma esnasında sabitlemede kullanılmaktadır.
8) Bağlantı kutusu: Bu kutunun içerisinde, pozisyon göstergesinin yağ geçirmeyen bağlantısı, iç kontrol bağlantıları ve hava koşullarından etkilenmeyen kontrol kabloları bulunmaktadır.
9) Tank üst kapağı: Havanın regülatör içerisine girmesini engelleyen sızdırmaz tank tasarımı sayesinde izolasyon sıvısının da oksitlenme oranı önemli derecede azaltılmıştır.
10) Sızdırmaz tank: Tüm yapının ve yapın içerisinde bulunduğu genel muhafazalı yapıdır.
11) Pozisyon göstergesi: Regülatörün anlık çalışma sırasında kademelerini gösterir. Ayar kademeleri ile regülasyon aralığı daraltılarak akım geçirme özelliği artırılabilmektedir.
12) Paralel parafudr bağlantı patronları: Buradaki mevcut olan 3 buşinge faz toprak arası parafudr bağlantısı yapılabilmektedir.
13) Sıvı kontrol göstergesi: Sıvı içinde yüzen bir topçuktan meydana gelen bu gösterge sayesinde izolasyon sıvısının seviyesi ve rengi hakkında bilgi alınabilmektedir.
14) Kontrol paneli kablosu: Geçme tip soket ile kolay sökülebilir kumanda kablosudur.
15) Kontrol paneli muhafazası: Komple contalı ve kilitlenebilir bir yapıya sahip olan bu kutu, ekranlı bir menfeze sahiptir. Bu sistem istenildiği takdirde uzun bir kablo ile kumanda panosunu uzak bir noktaya veya direğin altına da montajını sağlayabilmektedir.
16) AG kapasitör: Kademe değiştirici motorun yol verme kondansatörüdür.

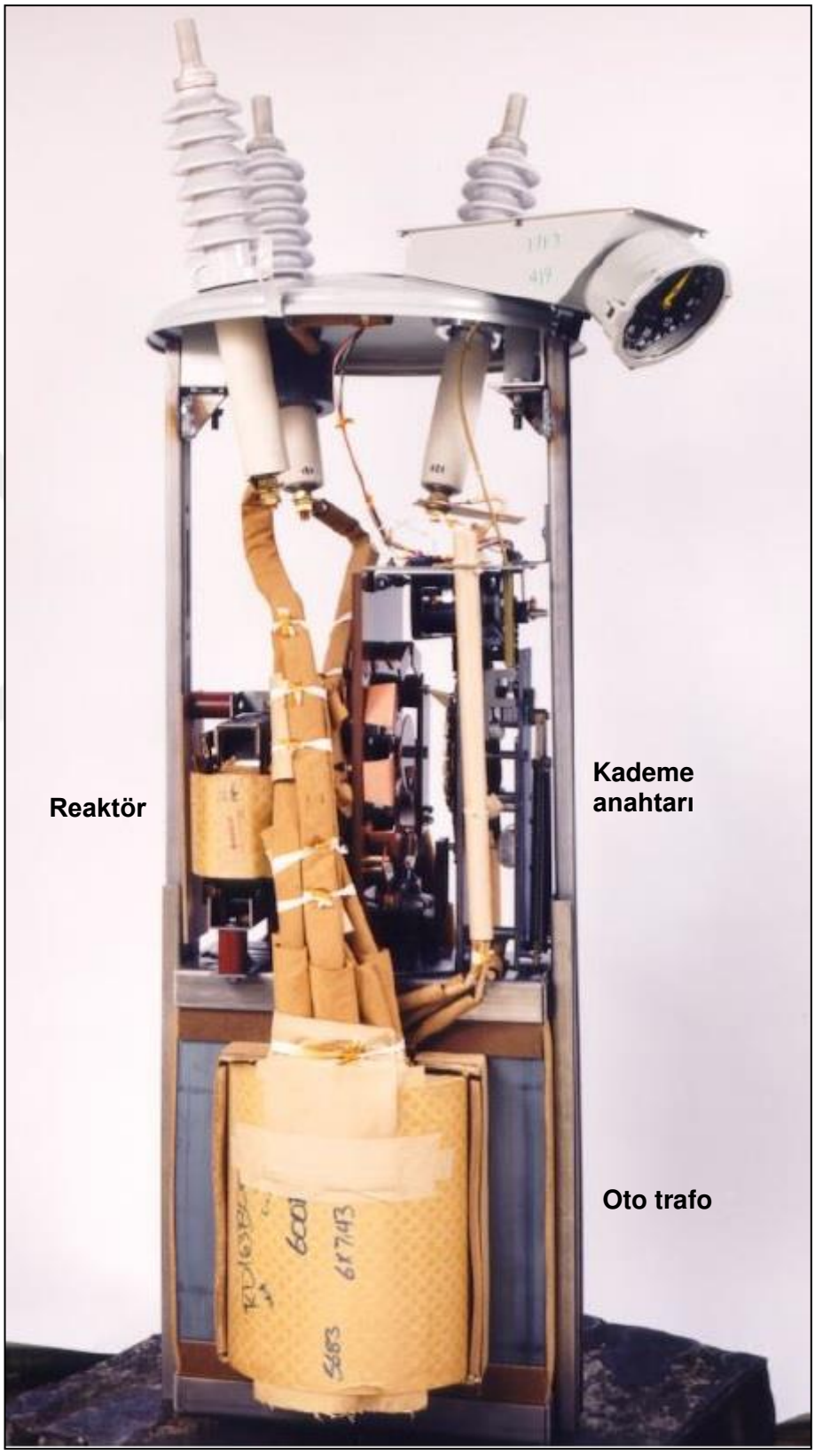
17) Lazer baskı etiket: 2 adet birbiriyle aynı özellikteki etiket plakaları kontrol panelinin ve tankın üzerinde bulunmaktadır.
18) Kontrol paneli: Regülatörün uzaktan izleme ve kontrol imkânı sağlayan, ölçüm verilerini depolayabilen ve uzaktan güncelleştirilebilir elektronik paneldir.
19) Sabitleme cıvataları: Alt tarafta 4 adet regülatörü kaideye sabitlemek için kullanılır.
20) Zemine montaj ayakları: Ağırlığına göre belirli gücün üzerindeki regülatörler zeminde beton kaideye montajı yapılır.
21) Topraklama bağlantı ucu: Gövdenin topraklanmasında kullanılan bu bağlantı uçlarından her tankta 2 adet bulunmaktadır.
22) Tahliye valfi: Örnek alma aparatı da içeren tahliye valfi her regülatörde standart olarak bulunmaktadır. Bu valf ile cihazın üstünde bulunan doldurma tapası örnek alma işi ile yağ filtre işlemini kolaylaştırmaktadır.
23) Kontrol paneli topraklama bağlantı noktası: Uzak bir noktaya montajı yapılmış kontrol panelinin topraklamasının yapıldığı bağlantı noktasıdır.
24) Basınç valfi: Tüm regülatörler 34,5 kPA basınçta devreye giren basınç valfleriyle donatılmışlardır.

### 4.1.1. İç yapısı

Gerilim Regülatörünün genel olarak üç ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki sargılardan oluşan oto trafo kısmı diğeri kademe anahtarı ve üçüncü kısmı da kontrol ünitesidir [23].

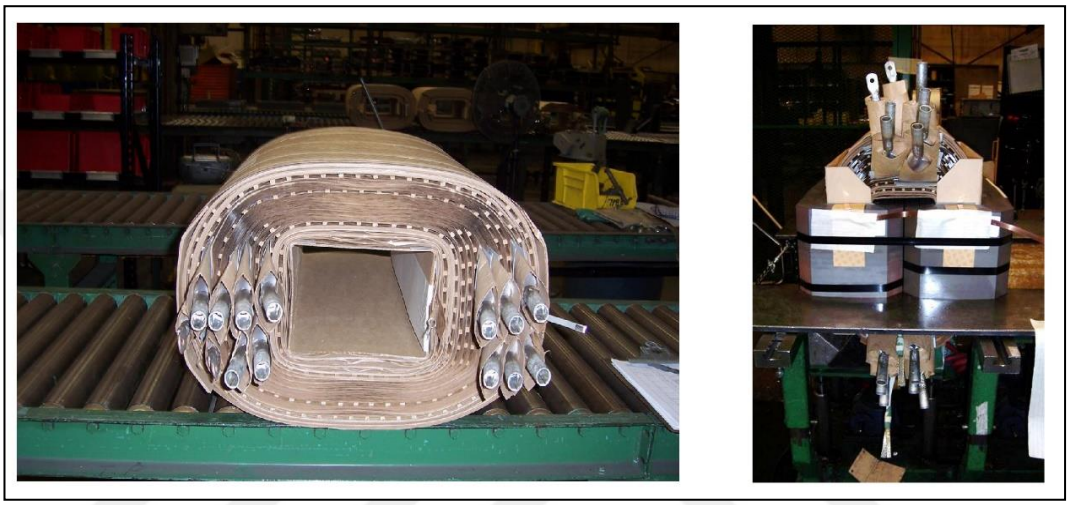
Gerilim regülatöründe oto trafo kısmı klasik çift sargılı trafodaki gibi imal edilmektedir. Burada primer sargı yerine şönt sargı veya uyartım sargısı, sekonder sargı yerine de seri sargı kullanılmaktadır. Fakat imal şekillerine göre şönt sargı her zaman girişte, seri sargı da çıkışta olmayabilir. Regülatör sargılarında dikkat edilecek husus, şönt sargı şebekeye paralel bağlandığı için nominal işletme gerilimine göre, seri sargı ise maksimum hat akımına uygun şekilde tasarlanmasıdır. Yani seçilecek regülatörün etiketindeki gerilim değeri işletmenin nominal gerilimini, akım değeri ise en yüksek regülasyon kademesinde taşıyabileceği hat akımını ifade etmektedir. Bu akım değeri regülatör kademesi düştükçe artmaktadır. Trafonun gücü ise hat akımı ve en yüksek regülasyon gerilimi değerine göre hesaplanarak imal edilirler. Örnek olarak %10 regülasyon kademesinde 34,5 kV gerilim seviyesine bağlı 100 A hat akımına uygun bir regülatörün gücü 200 kVA dır [24].

Şekil 4.5'te örnek bir gerilim regülatörünün iç yapısı görülmektedir. Burada oto trafo, reaktör, kademe anahtarı gibi kısımlar kolaylıkla görülmektedir.



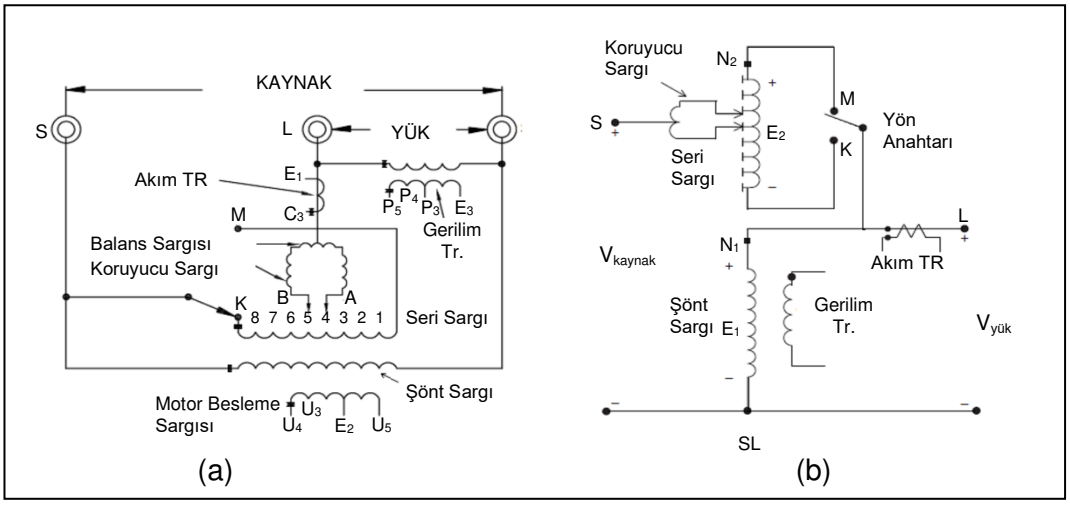

Şekil 4.5. EATON (Cooper) VR 32 gerilim regülatörü ve iç yapısı [23]

Genel olarak oto trafoda bulunan sargılar ve nüve yerleşimi Şekil 4.6'da görülmektedir [43]. Burada uygun gerilim değişimleri sağlamak için seri sargı üzerinde 8 adet sargı ucu bulunmaktadır. İlaveten 2 adet seri sargı girişi, 2 adet şönt sargı girişi ve 2 adet de yardımcı gerilim sargısı çıkışları ile toplam 14 adet uç çıkarılmaktadır. Bu yardımcı gerilim çıkışları kontrol panosu, kademe motoru gibi iç ihtiyaç elemanlarını beslemek ve ölçüm işlemlerini yapabilmek için kullanılmaktadır. Regülatörde tüm azaltma ve yükseltme işlemi bu sargı üzerinde yapılmaktadır.



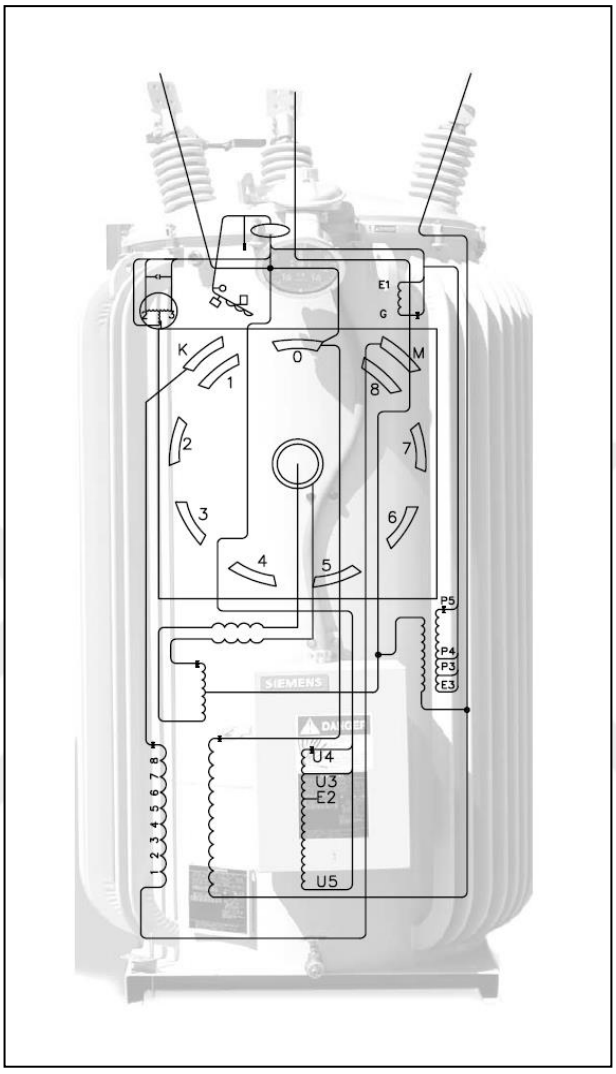
Şekil 4.6. Oto trafo sargıları

Gerilim regülatörleri uluslararası IEEE C57.15-2009 (IEEE 60076-21:2011) standardına uygun tip testlerinden geçerek üretilirler. ANSI standardında sargılar bağlantı yönüne göre A tipi (Doğru Bağlantı) ve B tipi (Ters Bağlantı) olarak iki şekilde tasarlanmaktadır. Şekil 4.7'de A ve B tipi regülatörün bağlantı şeması bulunmaktadır [41].



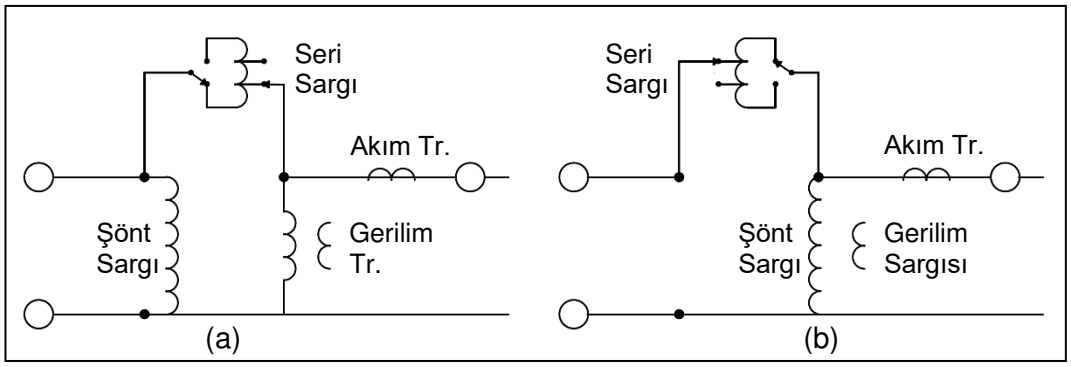

Şekil 4.7. a) A ve b) B tipi (Doğru ve Ters) bağlı regülatör şeması

Şekil 4.8'de ise standart bir A tipi gerilim regülatörünün örnek iç bağlantı şeması görülmektedir.




Şekil 4.8. A tipi regülatör iç şeması [40]

A ve B tipi tasarımların başlıca farkı, A tipinde şönt sargı girişte kaynak tarafında, seri sargı çıkışta yük tarafında bulunurken, B tipi tasarımda ise seri sargı girişte kaynak tarafında ve şönt sargı da çıkışa yük tarafına bağlanarak oluşmaktadır. Tasarımların ikisinde de kademeler seri sargı üzerinde bulunmaktadır. B tipi tasarımda şönt sargı çıkışta olduğu için referans gerilimi ölçmek için ayrıca gerilim trafosu bulunmamaktadır. Dağıtım sisteminde ağırlıklı olarak B tipi regülatör kullanılmaktadır [25]. Şekil 4.9'da A ve B tipi regülatörlerin prensip şeması görülmektedir.




Şekil 4.9. a) A ve b) B tipi regülatör prensip şeması

Genel olarak harici bağlantıları için A ve B tipi regülatörlerde herhangi bir fark bulunmamaktadır. Yapısal olarak A tipi regülatörler ±%10 aralığında ayar yaparken B tipi regülatörler +%10 ila-%8,3 arasında ayar imkânı sunar. Her iki regülatör birlikte kullanılarak bir grup oluşturulabilir. Burada sadece farklı tipteki regülatörlerin paralel bağlantılı çalışması durumunda aynı kademede olsa dahi kendi aralarında dahili bir sirkülasyon akımı oluşabilmesi etken olarak gözükebilir [23].

### 4.1.2. Reaktör

Regülatörde reaktör ise kademe anahtarı kontakları üzerine bağlanarak kademe değişimi sırasında kesinti hissedilmeden akım sürekliliğini sağlamak için kullanılmaktadır.

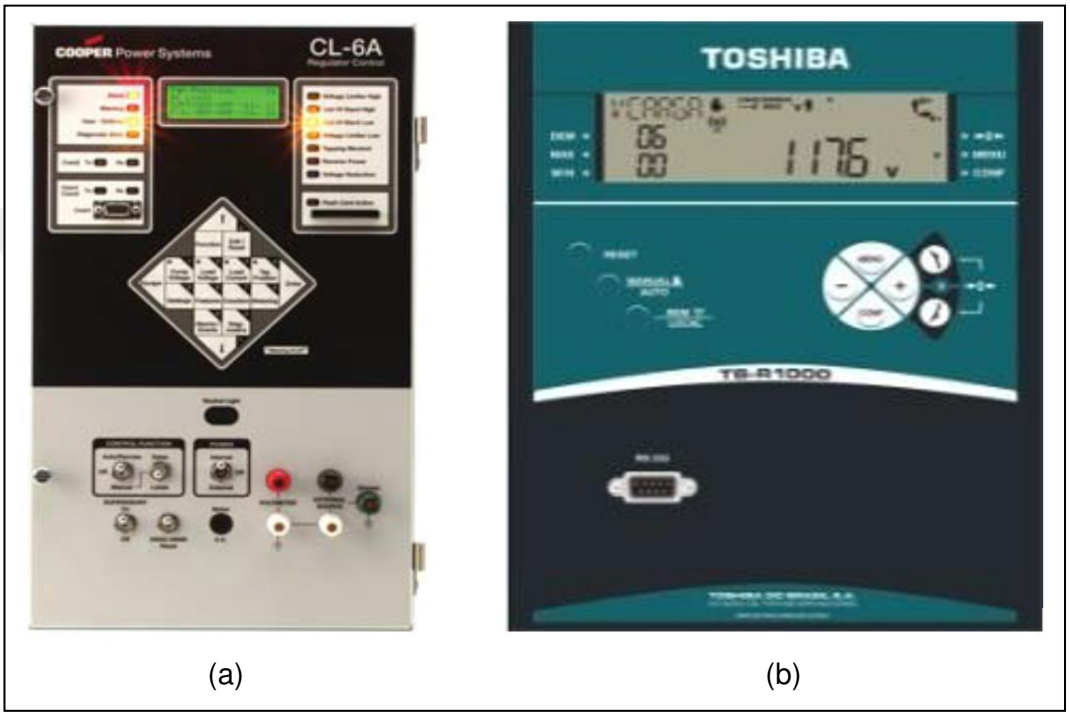



Şekil 4.10. a) Mantel tipi ve b) çekirdek tipi reaktör

Reaktörler klasik trafolar gibi Şekil 4.10'daki gibi mantel veya çekirdek tipi olarak üretilebilirler. Bunlardan çekirdek tipi reaktörde bobinler iç içe geçtiği için nominal yük akımında daha düşük empedansa sahip olacağından daha düşük gerilim düşümüne sebep olur. Buna karşın boyutları diğerine göre biraz daha büyüktür [25].

### 4.1.3. Kontrol paneli

Gerilim regülatörlerinin izleme ve kontrolü üzerindeki kumanda paneli sayesinde yapılmaktadır. Bu panel ile gerekli veri toplama, durum güncelleştirmeleri ve uzaktan izleme işlemleri yapılabilmekte, oluşan olayları kaydedebilmektedir. Ayrıca bu paneller SCADA uygulamaları ile entegre olabilirler. Şekil 4.11'de farklı modellerde kontrol paneli görülmektedir.




(a) (b)

Şekil 4.11. a) Cooper CL-6 ve b) Toshiba TB-R1000 kontrol panelleri

CL-6 serisi kontrol panelleri Siemens, GE ve Howard gibi diğer gerilim regülatörleri ile çalışabilmektedir. Toshiba ise TB R-1000 veya TVC serisi kontrol panelleri kullanmaktadır.

Bu kontrol panelleri güç ve enerji izleme, uyarı bilgileri, olayların tarih, gün, saat olarak saklanması gibi özellikleri mevcuttur. Aynı zamanda isteğe bağlı olarak popüler kullanılan RS232/485 veya fiber optik bağlantılar vasıtasıyla SCADA sistemleri ile haberleşmesi sağlanabilmektedir.

### 4.1.4. Kademe anahtarı ve göstergesi

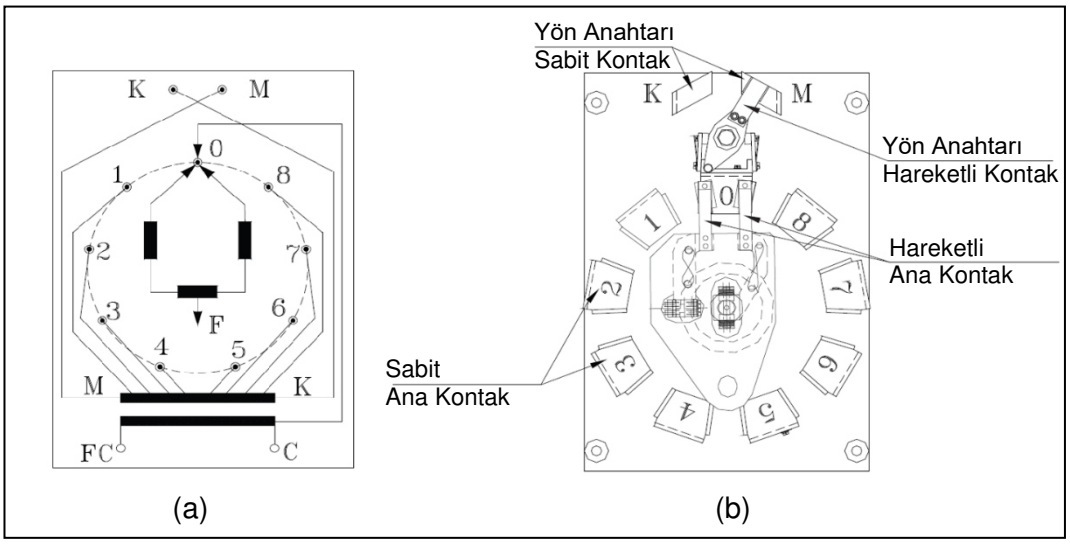
Regülatör set edilen gerilim değerine uygun çıkış vermesi için yük çıkışı üzerinden aldığı referans gerilime göre oto trafonun çıkış sargıları arasında değişiklik yapmaya ihtiyaç duyar. Bu işlemi, yapısında bulunan kademe anahtarı ile yapmaktadır.

Şekil 4.12'de tek fazlı gerilim regülatöründe kullanılan örnek bir kademe değiştirici görülmektedir. Kademe değiştirici tek fazlı üç uçlu yardımcı kutuplu bir asenkron motor ile kontrol edilir. Bu sayede sabit hızla kademe geçişi sağlanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus motorun kontrolü için kumanda panosunda bir adet yardımcı kondansatör bulunmaktadır. Şayet bu kondansatör arıza yapar ise kademe değiştirici çalışmayacaktır.



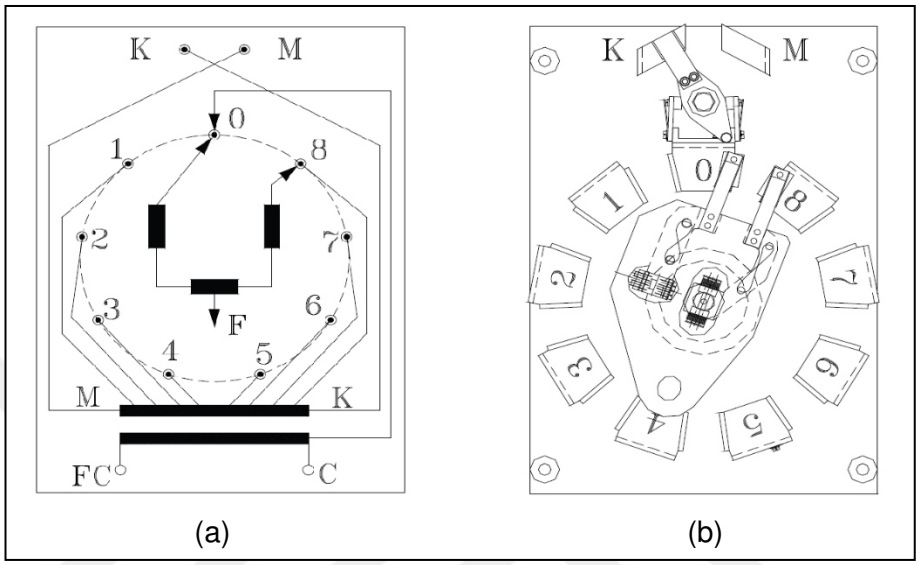
Şekil 4.12. Kademe değiştirici yapısı [46]

Kademe anahtarının yapısal şeması Şekil 4.13'te görülmektedir. Genel olarak yapısında sabit ve hareketli kontaklar ile yön değiştirme anahtarı mevcuttur.

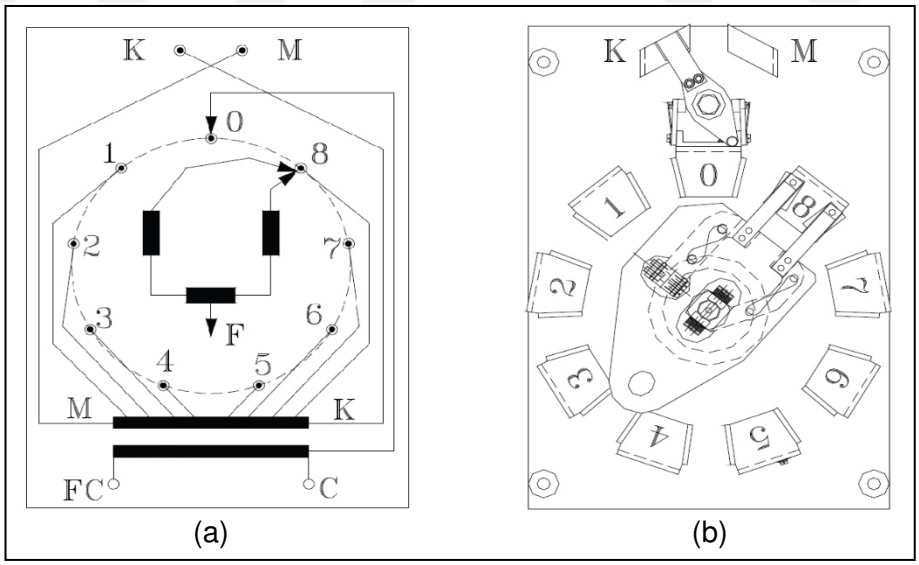



Şekil 4.13. a) Bağlantı yapısı ve b) kontak plakaları [17]

Hareketli kontağın da iki ayağı vardır. Böylece regülatörün bir kademeden diğer komşu kademeye hareketi adım adım gerçekleşmektedir. Bu hareket esnasında, birinci adımda Şekil 4.14'teki gibi ilk kademe devresi diğer sargıya geçerken, ikinci adımda Şekil 4.15'teki gibi geride kalan kontağı yanına alarak kademeyi tamamlamaktadır.




Şekil 4.14. Ters yön 1. kademede a) bağlantı, b) kontak durumu [17]

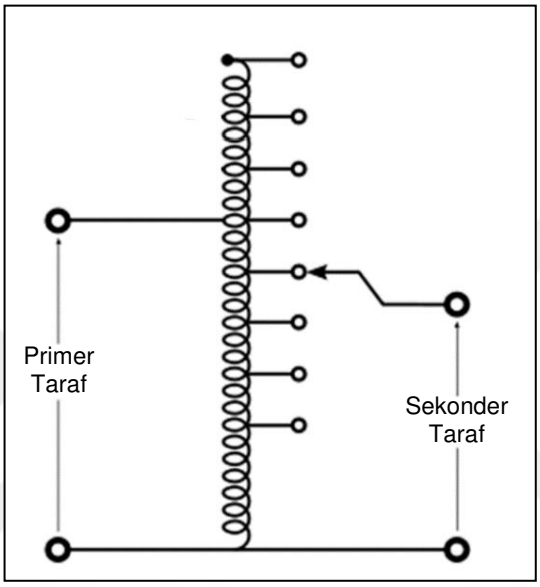



Şekil 4.15. Ters yön 2. kademede a) bağlantı, b) kontak durumu [17]

Yön anahtarı ise akım yolunun seri sargının ne tarafından gireceğini belirler. Yani kontaklar saat ibresi yönünde dönüyorsa K kontağı, tersi yönde ise M kontağı kapanarak seri sargının yönü değişmiş olur. Böylece tek sargıyı iki yönde kullanarak

gerilim düşürme ve yükseltme işlemi aynı sargı ile yapılabilir. Sadece fark olarak ters yönde 8. kademe 1. kademe gibi görev yapmasıdır.

Burada önemli husus eğer yön anahtarı olmasaydı gerilimi düşürmek için Şekil 4.16'daki gibi primer tarafta da sargı ucu ihtiyacı olacak ve ilave sargı ile toplamda 16 adet sargı ucu çıkarmak gerekecekti. Bunun yerine sekonder sargının yönü değiştirilerek aynı işlem yapılmaktadır.




Şekil 4.16. Oto trafo

Regülatör çalışma esnasında kullanıcının bu kademeleri görebilmesi için Şekil 4.17'deki gibi bir gösterge regülatörün dışında bulunmaktadır. Sağ taraf saat ibresi yönünde yükseltme işlemini, sol taraf ta saat ibresi tersi yönünde düşürme işlemini göstermektedir. Ayrıca gösterge üzerinde minimum ve maksimum değerleri gösteren sabit ibreler vardır. Böylece kullanıcı regülatörün göstergesine baktığında o zamana kadar kaç kademe yukarı veya aşağı hareket ettiğini görebilmektedir.

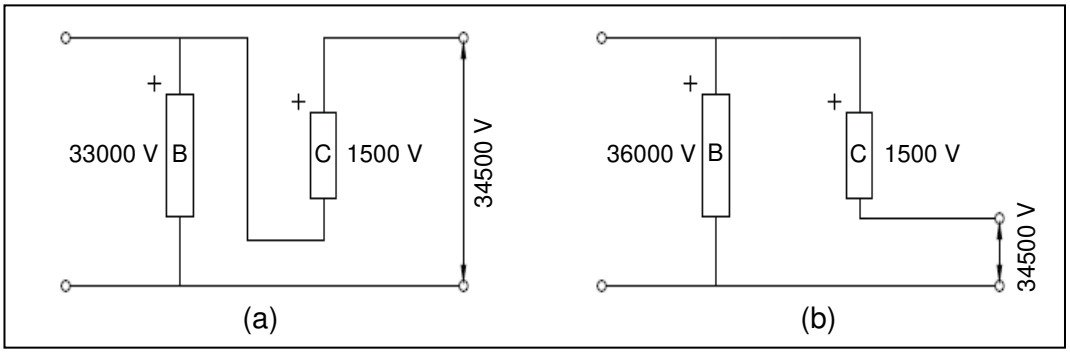



Şekil 4.17. Kademe değiştirici göstergesi

### 4.2. Çalışma Prensibi

OG gerilim regülatörlerinin şönt sargıları klasik gerilim trafosu gibi tek bir sargıdan oluşur. Bu sargı seri sargıda ihtiyaç duyulan gerilimin indüklenmesi için manyetik alanın oluştuğu esas kısımdır. Aynı zamanda ölçme ve koruma işlemleri için de referans gerilimin üretildiği sargıdır. Seri sargı kısmında ise ayar yapmak için kademe çıkışları bulunmaktadır. Bu ayar sargıları, giriş gerilimini destekleyecek yönde bağlanırsa, sekondere bağlı bara gerilimi yükseltilir. Eğer ayar sargıları giriş gerilimini azaltacak yönde bağlanırsa, sekondere bağlı gerilim seviyesi düşürülür. Normalde ayar sargıları %0,6-2,1 arasına değişim göstermektedir. Tüm kademe sayıları ile bu değer toplamda %10-15 arasında gerçekleştirilmektedir.

Regülatörde gerilim alçaltma veya yükseltme (buck-boost) işlemi tek bir seri sargı ile yapılmaktadır. Bu işlem sargıların polaritesi ile belirlenir. Şönt ve seri sargı aynı polaritede bağlı ise yükseltme işlemi, ters polariteli bağlı ise alçaltma işlemi yapılır. Regülasyon Şekil 4.18'de görüldüğü gibi sekonderin bağlantı yönüne göre gerilim yükseltme veya alçaltma işlemi ile yapılmaktadır. Buradaki bu değişim otomatik kademe değiştirici üzerindeki yön anahtarı sayesinde yapılmakta ve ihtiyaca göre sekonderin polaritesi ve kademeleri değiştirilmektedir.



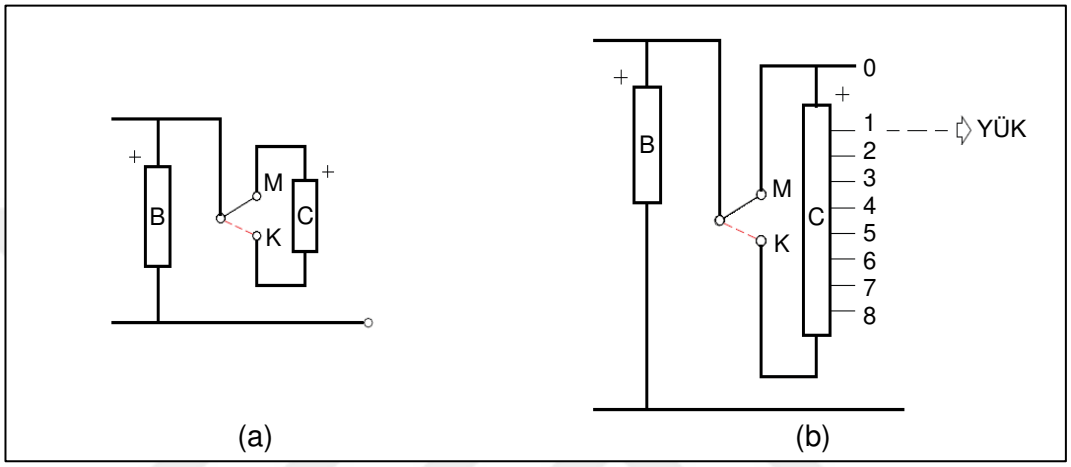

Şekil 4.18. Regülatör prensip şeması a) yükseltme b) alçaltma işlemi

Örnek şemada şebeke gerilimi 33 kV seviyelerine düştüğünde seri sargı 1,5 kV ilave ederek gerilimi 34,5 kV değerine yükseltmekte, tersi olarak şebeke gerilimi 36 kV değerine kadar yükseldiğinde ise aynı sargı ters bağlanarak gerilimi 34,5 kV seviyesine düşürdüğü ve çıkış gerilimini sabit tuttuğu görülmektedir.

Regülatörler daha hassas gerilim ayarı yapabilmek için 16 değişken kademe ve 1 adet merkez kademe ile tasarlanır. Sonuç olarak gerilim regülatöründe 1'i merkezi, 16'sı gerilimi yükseltmek, 16'sı da gerilimi düşürmek amacıyla kullanılabilen 33

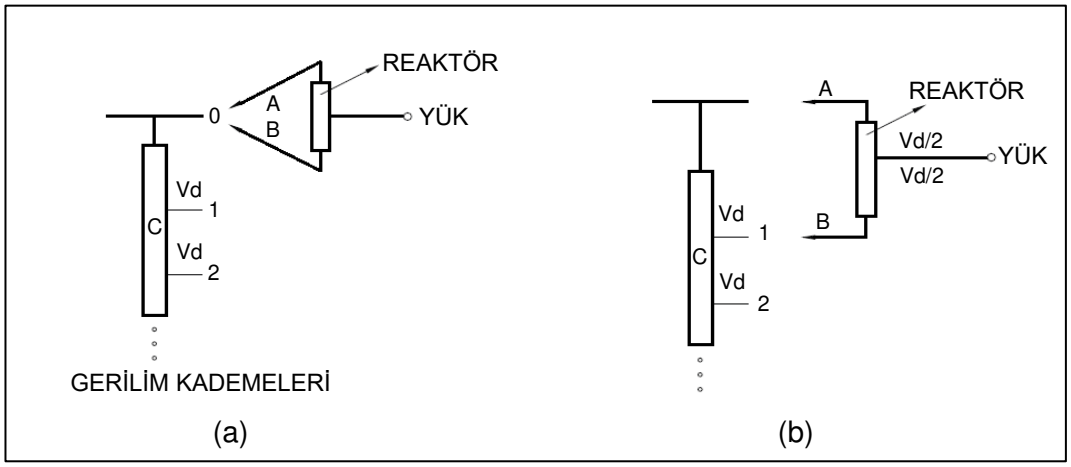
kademe pozisyonuna sahip olur. Buna 32 kademeli regülatör denir. Şu anda en fazla 32 kademe ayarı yapabilen transformatörler imal edilmektedir [18].

Şekil 4.19'da basit olarak yön değişim anahtarı ve seri sargı gerilim kademeleri gözükmektedir. Burada B sargısı şönt sargıyı C sargısı da seri sargıyı göstermektedir. Böylece istenilen gerilim seviyesine göre uygun kademe ayarlanarak gerilim artışı veya eksilişi sağlanır.




Şekil 4.19. Seri sargı a) yön ve b) kademe değiştirme sistemi [17]

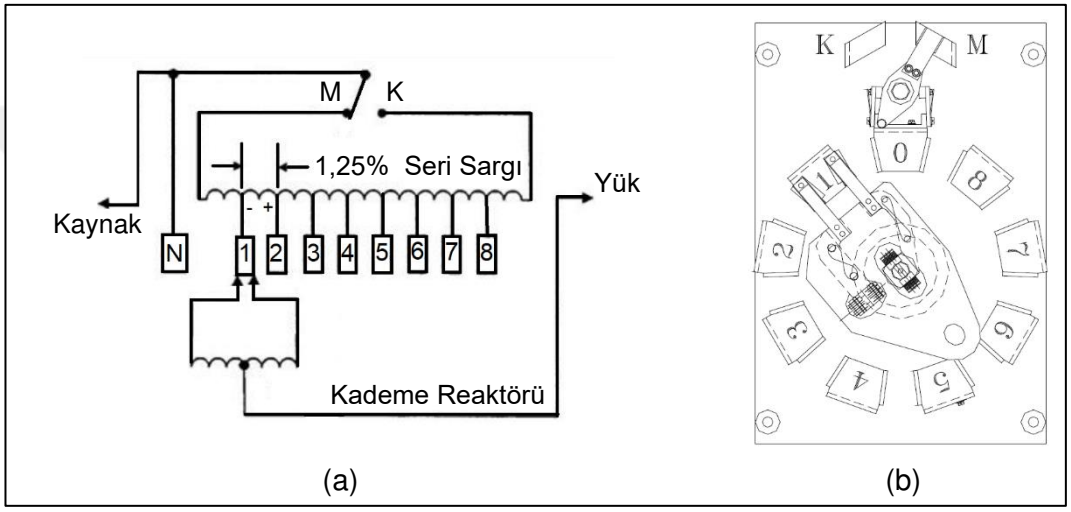
Fakat uygulamada resimde gözüktüğü gibi yük çıkışı direk sargılar üzerinden alınmamaktadır. Kademe değişim esnasında yük akımına bağlı olarak çıkışta enerjinin sürekliliğini sağlamak ve güvenli bir şekilde kademe atlamayı gerçekleştirmek için Şekil 4.20'deki gibi kademe anahtarı üzerine bağlanan reaktör ile çıkış alınmaktadır.




Şekil 4.20. Reaktör ile kademe geçiş sistemi a) 0. kademe b) 1. kademe [17]

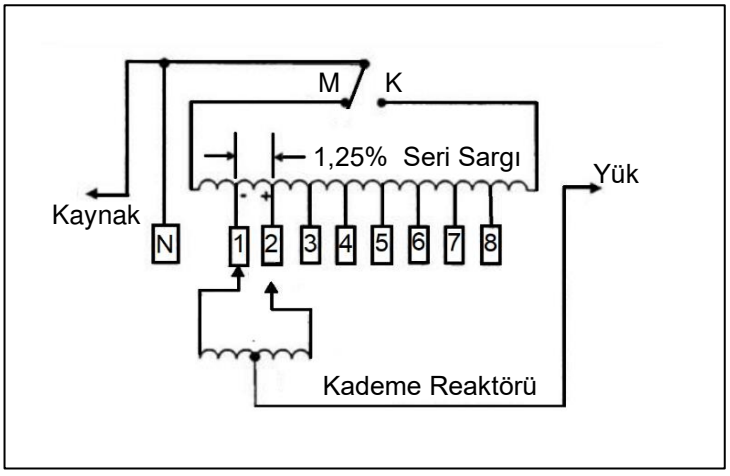
Ayrıca bu yöntem ile reaktörün orta ucu sayesinde yarım adım atarak 8 adet sargı çıkışı ile 16 adet kademelendirme yapmaya imkân sağlamaktadır. Bu sayede günümüzde de birçok üretici pozitif yönde 16 negatif yönde 16 adet kademe olacak şekilde toplam 32 kademeli gerilim regülatörü üretmektedir.

Şekil 4.21'de 2. kademedeki regülatörün simetrik pozisyondaki iki adımlı kademe değiştiricisinin, merkez kademeyle bağlantısı görülmektedir. Burada kademe numarası her iki ayağın bastığı sargı ucunun toplamıyla bulunmaktadır. Yani iki ayak ta 1. sargıya bastığı için regülatör 2. kademede bulunmaktadır.



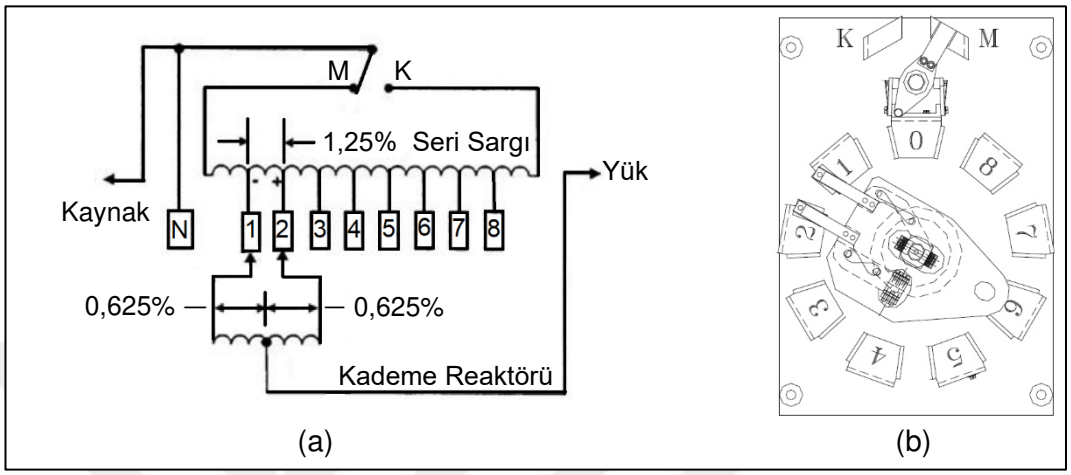

Şekil 4.21. Simetrik iki hareketli a) bağlantı, b) kontak pozisyonu

Kontrol paneli kademe değişimi için komut gönderdiğinde hareketli kontak ilk olarak Şekil 4.22'deki gibi bir ayağı kaldırarak diğer kontağa hareket eder. Bu süre yaklaşık 25-30 ms'de gerçekleşip bu sırada akım reaktör üzerinden geçmeye devam etmektedir.




Şekil 4.22. Asimetrik pozisyonda bir hareketli kontak

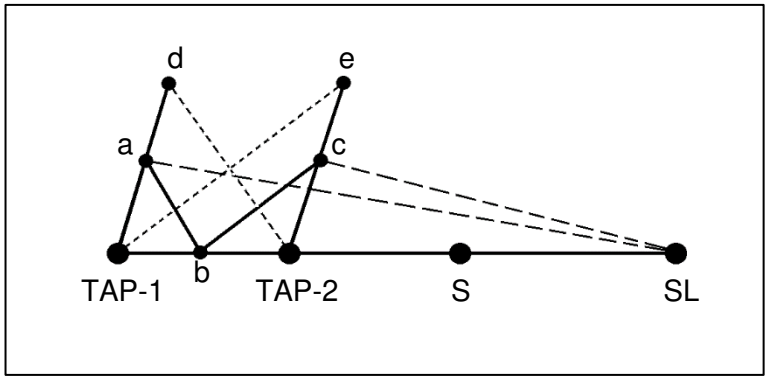
Adım sonucu olarak kontaklar Şekil 4.23'teki gibi asimetrik pozisyonda kalır ve yükü komşu kademeye aktarmaya başlar. Böylece regülatör 3. kademeye geçmiş olur. Bu durumda kademe kontakları köprü pozisyonunda konum alır ve reaktör devrede kalır.




Şekil 4.23. Köprü durumu iki hareketli a) bağlantı, b) kontak pozisyonu

Dolayısıyla tek kademelerde reaktör köprü konumunda kalıp asimetrik olarak akım yolunu değiştirir. Çift kademelerde ise reaktörün uçları kısa devre olarak simetrik pozisyonda kalmaktadır. Yani hareketli kontaklar 8 köprülü (asimetrik) ve 8 köprüsüz (simetrik) pozisyonda temas ederek toplamda bir yöne doğru 16 kademede adım hareketi yaparlar.

Şekil 4.24'teki 1. kademeden 2. kademeye geçiş sırasında gerilim fazörünün değişimini gösterilmektedir. Bu şekilde "S ile SL" arası fazör, kaynak ya da düzenlenmemiş gerilimi göstermektedir. Seri sargının uç isimleri "S~TAP-1" ve "TAP-1~TAP-2" ile gösterilmektedir.




Şekil 4.24. Kademe değişiminde gerilim fazör diyagramı

SL~TAP-2, Şekil 4.21'de simetrik pozisyonda gösterildiği gibi iki kontak TAP-2'de kapalıdır.

SL~a, Şekil 4.22'de asimetrik pozisyona geçtiği esnada bir kontak TAP-2'de kapalı diğeri boştadır. TAP-2~a reaktörün yarısı üzerindeki gerilim düşümünü göstermektedir

SL~b, Şekil 4.23'te köprü pozisyonunda gösterildiği gibi hareketli kontaklar ardışık sabit kontaklar üzerinde konumlandırılmıştır.

SL~c, asimetrik pozisyonda bir kontak TAP-1'de kapalıdır. TAP-1~c reaktör yarısı üzerindeki gerilim düşümüdür.

TAP-1~c ve TAP-2~a, asimetrik pozisyonda reaktör tarafından oluşturulan reaktans gerilimleridir.

TAP-1~e ve TAP-2~d, toplam reaktör gerilimini gösterir.

TAP-2~e, TAP-2'de köprü pozisyonu açıkken gerilim eğilme dayanımını göstermektedir.

TAP-1~d, TAP-1'de köprü pozisyonu açıkken gerilim eğilme dayanımını göstermektedir.

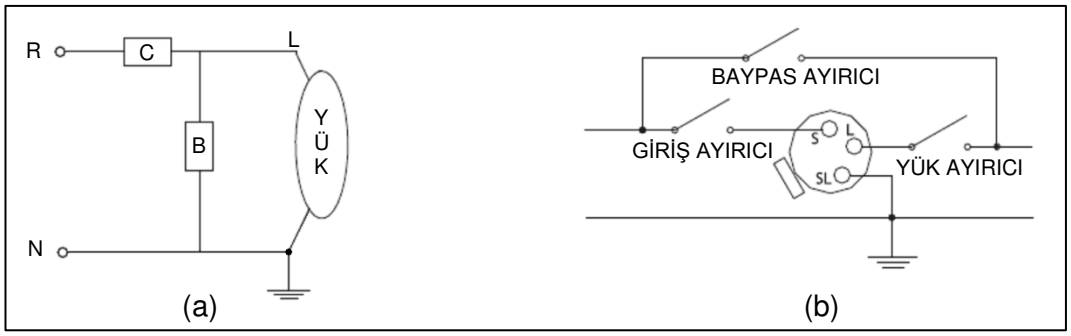
Böylelikle kademe geçişleri sırasında herhangi bir kesinti oluşmaksızın gerilim değişimi gerçekleşmektedir.

### 4.3. Regülatör Bağlantı Türleri

Gerilim regülatörleri tek fazlı veya üç fazlı olarak üretilebilirler. Fakat genel olarak tek fazlı ürünler daha yaygındır. Bu sebeple regülatörler üç fazlı sistemde ihtiyaca göre 2 veya 3 adet regülatör grubu değişik şekillerde bir araya getirilerek kullanılırlar. Bu şekildeki oluşturulan grup yapısına bank denilmektedir.

#### 4.3.1. Tek fazlı bağlantı

Regülatörler genelde tek ünite olarak üretildiği için tek fazlı sistemlerde de rahatlıkla kullanılabilmektedir. Tek fazlı bağlantıya ait tek hat şeması Şekil 4.25'te görülmektedir.

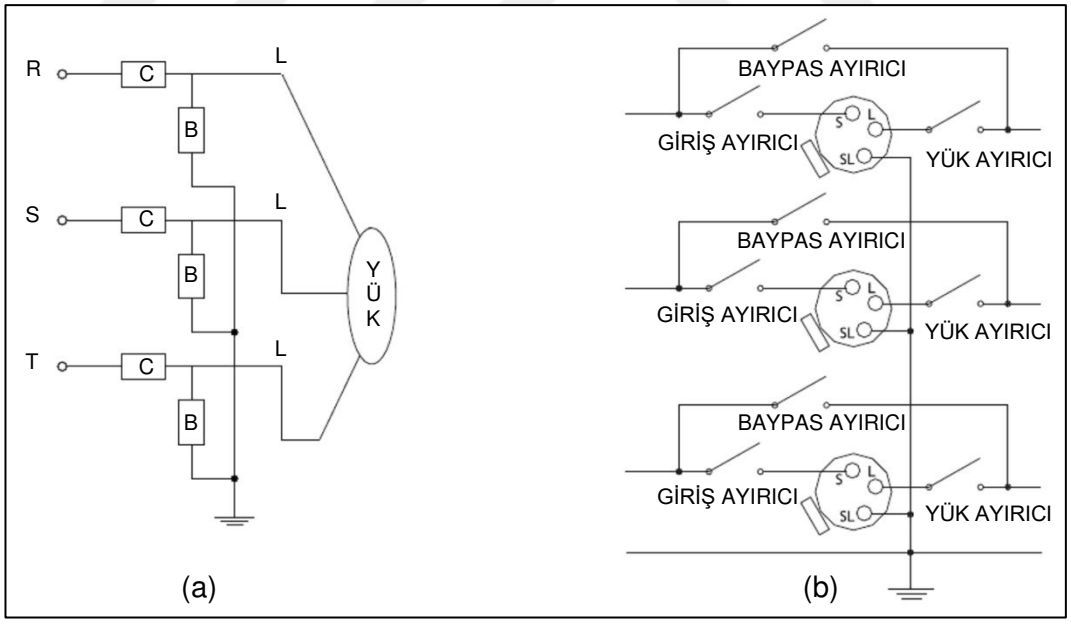



Şekil 4.25. Tek fazlı a) bağlantı ve b) tek hat şeması

Böylece hatta seri bağlı sargı vasıtasıyla giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasında istenilen seviyede regülasyon yapmaktadır.

### 4.3.2. Yıldız bağlantı

Bu bağlantı tipi üç adet regülatörün Şekil 4.26'daki gibi yıldız şeklinde bağlanması ile oluşturulan bağlantı şeklidir. Özellikle büyük güçte zeminde kaideye monteli regülatörler için tercih edilmektedir. Aynı zamanda gerilim değerleri faz gerilimi seviyesinde olduğu için izolasyon açısından daha güvenlidir.




Şekil 4.26. Yıldız a) bağlantı ve b) tek hat şeması

Bu bağlantı en verimli bağlantı şeklidir. Bu şekilde 3 faz dengelemesi ve regülasyonu yapılabilmektedir. Regülasyon seviyesi ±%10 olacak şekilde ayarlanmaktadır. Bu bağlantı esasen regülatörlerin tek fazlı sistemde kullanımına

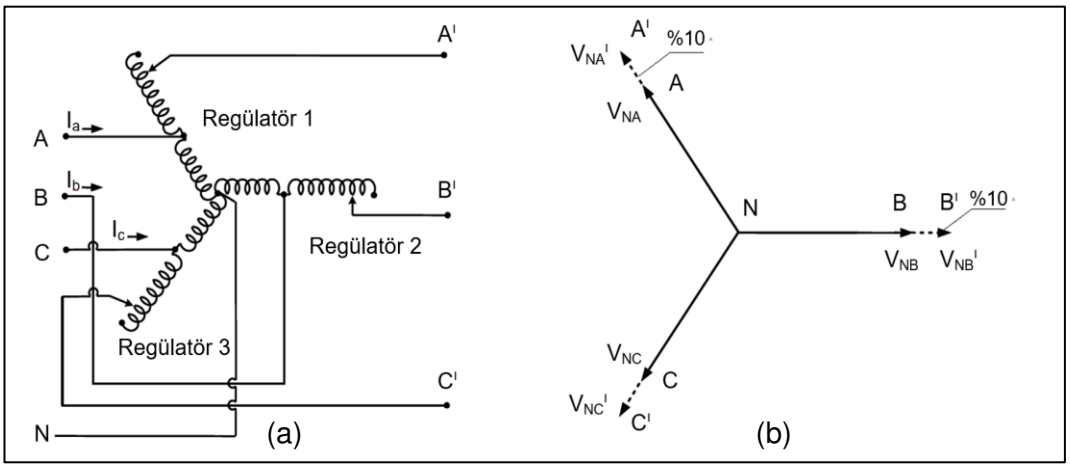
benzemektedir. Her bir regülatörün girişi faz ile toprak arasına bağlanılarak bu fazın gerilimi istenilen seviyede düzenlemektedir.

Şekil 4.27'de yıldız bağlantı örneği görülmektedir. Burada regülatörlerin SL uçları topraklanarak kullanılmıştır. Bu sebeple bu kutuplarda izolasyon yoktur.




Şekil 4.27. Yıldız bağlı regülatör uygulama örneği

Regülatörün +%10 gerilim regülasyonu yaptığı değerlendirildiğinde Şekil 4.28'deki gibi bir fazör diyagramı oluşacaktır.




Şekil 4.28. a) Yıldız bağlantı ve b) fazör diyagramı

Bu bağlantı türü dengesiz yüklerin ağırlıklı olarak bulunduğu ve işletme topraklaması veya nötr hattının olduğu sistemlerde kullanılmaktadır.

Burada dikkat edilecek diğer bir husus ta kaynak trafonun üçgen, regülatörün yıldız bağlı olması durumudur. Böyle bir bağlantıda sistemde nötr hattı olmayacağından dengesiz yüklenme durumunda regülatörün sanal nötr noktasında kayma olacağı için regülatör kademelerinde otomatik değişimler olabilecektir. Bu durumda genellikle bazı regülatörler maksimum kademeye diğerleri de minimum kademeye geçmektedir [17].



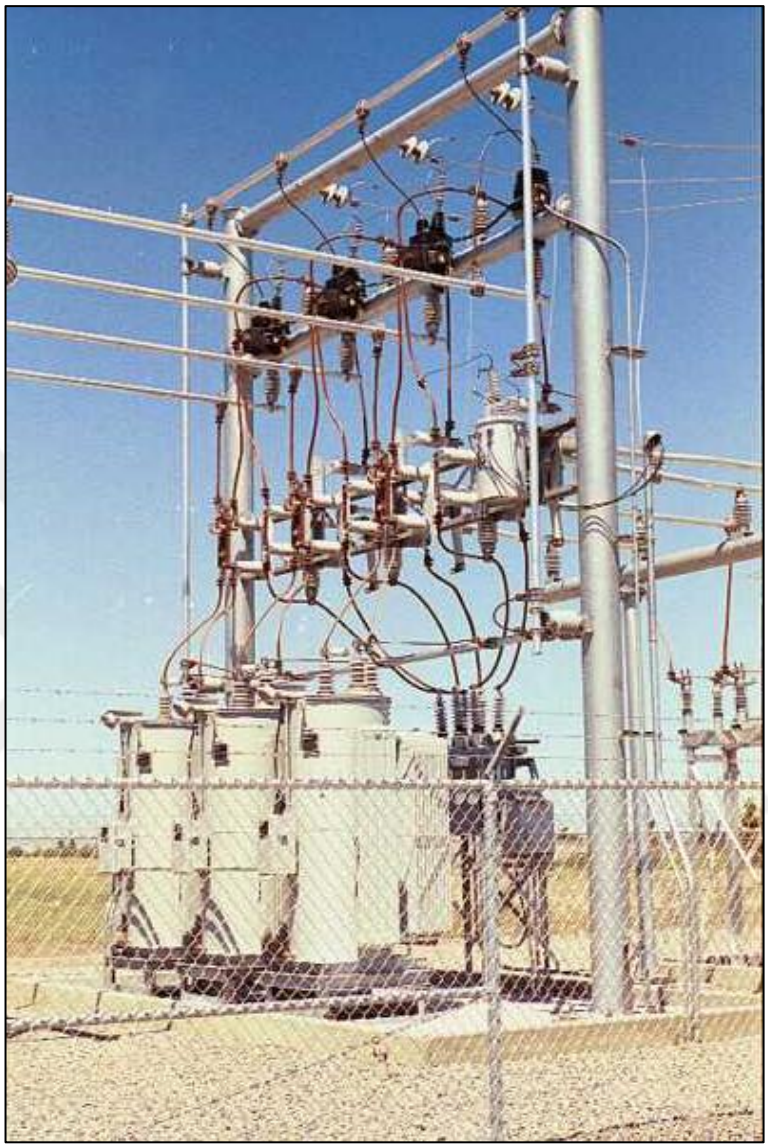
Şekil 4.29. Direk tipi yıldız bağlantı uygulama örneği

Şekil 4.29'da yıldız bağlantı için direk tipi uygulama örneği görülmektedir. Regülatörlerde de trafolar gibi belirli bir ağırlıktan düşük olanların direk tipi uygulamaları mevcuttur.

### 4.3.3. Kapalı üçgen bağlantı

Bu bağlantı işletme topraklaması veya nötr hattının bulunmadığı durumlarda kullanılmaktadır. Özellikle üç fazlı havai hat direk tipi montajlarda uygulanan yöntem aynı şekilde 3 adet regülatörün üçgen şeklinde bağlanmasıyla oluşturulmaktadır. ±%15 seviyesinde regülasyonu yapabilmesi önemli bir avantaj sağlarken regülatör seçiminde ise hat gerilimine göre seçim yapmak dezavantaj olarak gözükmektedir.

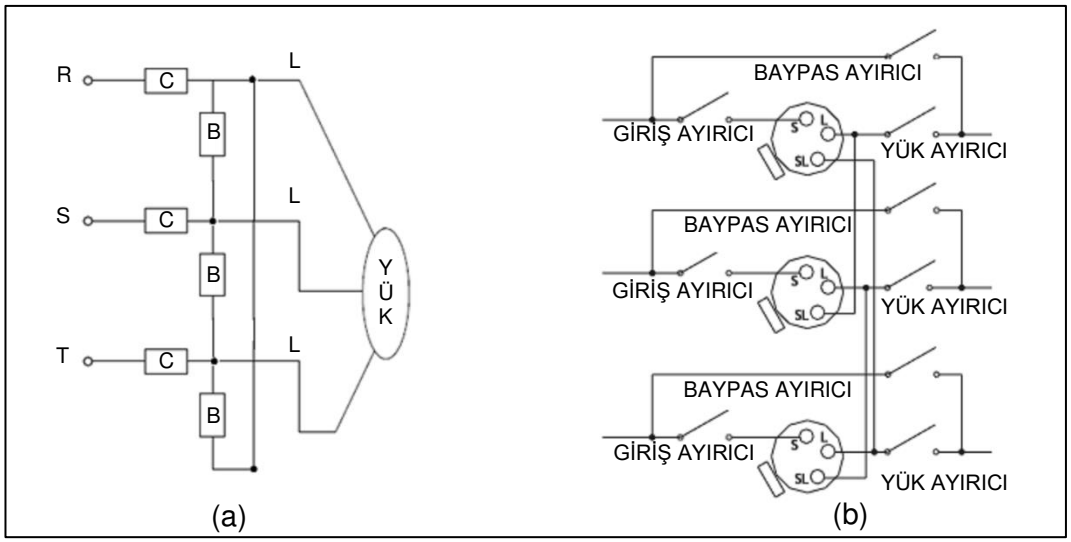
Burada esasen her faz yine %10 gerilim ayarlaması yapmaktadır. Fakat bu değer faz-faz arası %15 değerini bulmaktadır.



Şekil 4.30. Kapalı üçgen bağlantı uygulama örneği

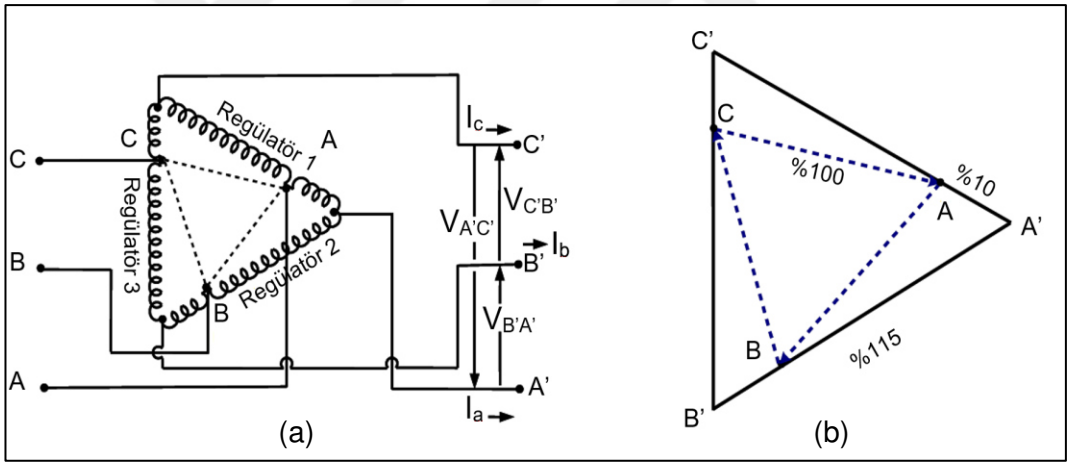
Bu uygulama şeklinin bir örneği Şekil 4.30'daki gibi fazlar arasına bağlı zemine monteli üç adet tek fazlı regülatör uygulamasında görülmektedir [44].

Bu bağlantı Şekil 4.31'deki bağlantı şemasına göre yapılır ve her bir regülatörün girişi fazlar arası bağlanır. Bu noktadaki gerilimi ölçen regülatör, S ucunun bağlı olduğu fazın gerilimini regüle eder. Fakat sistemde nötr noktası olmadığı için bu gerilim değişimi diğer fazlara da yansır. Ayrıca giriş ve çıkış arasında 30° gibi faz farkı mevcuttur.




Şekil 4.31. Kapalı üçgen a) bağlantı ve b) tek hat şeması

Kapalı üçgen bağlantı ile gerilim regülasyonunun fazörü Şekil 4.32'de görüldüğü gibi gerilim regülasyonu yapmaktadır.

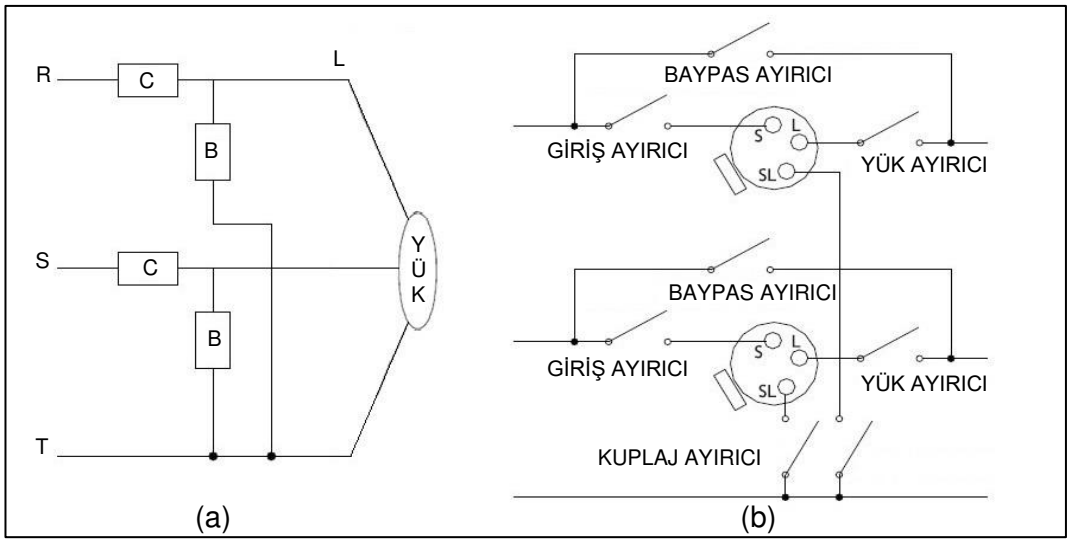



Şekil 4.32. Kapalı üçgen a) bağlantı ve b) fazör diyagramı

Sistemde nötr noktası bulunmadığı ve ölçüm referansı fazlardan alındığı için gerilimlerin faz başına artışı ile sistemin genelinde açısal bir fark oluşmaktadır.

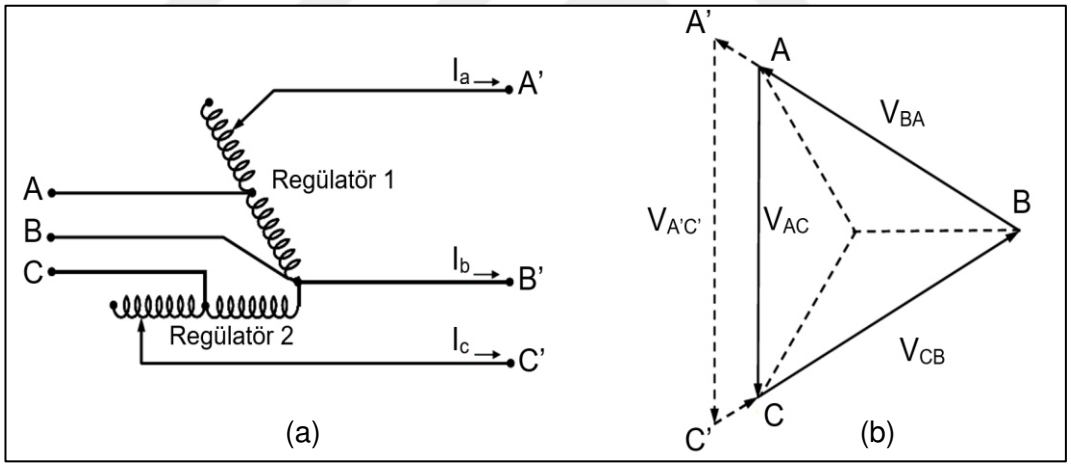
### 4.3.4. Açık üçgen bağlantı

Bu yöntemle ise fazlar arasına takılacak 2 adet regülatör ile 3 fazlı sistemin regülasyonu yapılabilmektedir. Böylece bir adet regülatör den tasarruf edilmektedir. En büyük avantajı budur. Bu bağlantı şekli ile ±%10 seviyesinde regülasyon yapabilmektedir. Yine bu sistem Şekil 4.33'teki gibi işletme topraklaması veya nötr hattı bulunmayan sistemlerde kullanılır.




Şekil 4.33. Açık üçgen a) bağlantı ve b) tek hat şeması

Şekil 4.33'te bağlantı şekli görülen bu uygulamada fazların biri ortak olarak kullanılır ve gerilim referansı bu fazdan alınır. Böylelikle iki fazda ayarlama ile Şekil 4.34'te görüldüğü gibi üçüncü fazda da ayarlama yapılmaktadır.




Şekil 4.34. Açık üçgen a) bağlantı ve b) fazör diyagramı

Bu bağlantı tipindeki en büyük problem hat gerilimlerinin ve yüklenmenin dengeli olması beklenmektedir. Zira tek fazı tek başına ayarlaması durumunda bile diğer fazlarında etkilenmesi muhtemeldir.



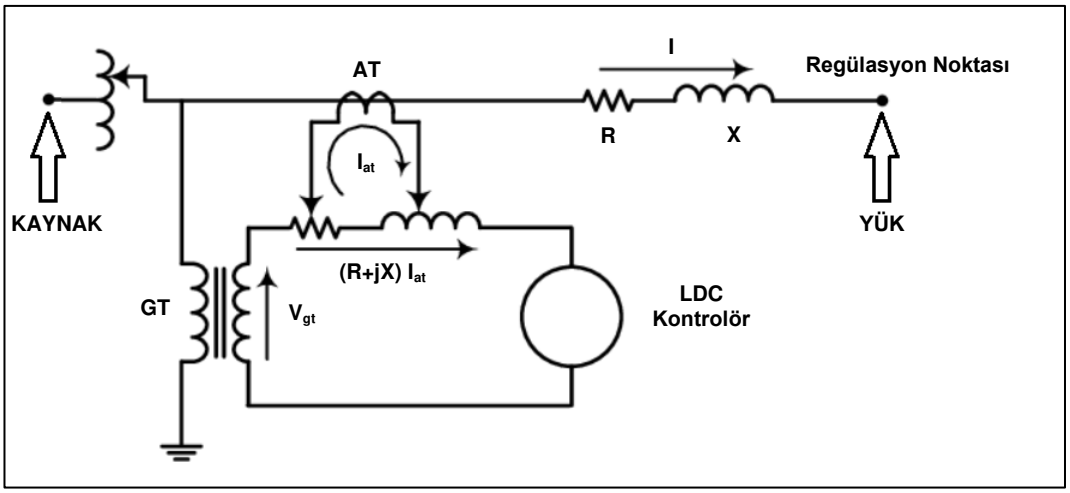
Şekil 4.35. Açık üçgen bağlantı uygulama örneği

Şekil 4.35'te uygulama örneği görülen açık üçgen bağlantının en büyük avantajı, aynı hat üzerinde birden fazla noktaya ardışık tesis edilmesi ihtiyacı doğduğunda önemli bir yatırım maliyeti avantajı sağlamasıdır [17].

### 4.4. Kontrol Sistemi

Gerilim regülatörü gerekli regülasyonu sağlamak amacıyla bir dizi kontrol mekanizmasını işletmek zorundadır. Bunun için öncelikle bulunduğu nokta üzerinde ihtiyaç duyacağı elektriksel parametreleri ölçmesi gerekmektedir. Bu ölçümler öncelikle çıkış gerilimi ve yük akımıdır. Bunun yanı sıra akımın akış yönü ve yükün karakterinin de belirlemesi gerekmektedir.

Bunu yapısında bulunan akım ve gerilim trafolarıyla ölçtüğü verileri kontrol panelinde değerlendirerek yapmaktadır. Bu denetim ve düzenleme işlemine gerilim düşümü kompanzasyonu (Line Drop Compensation) olarak isimlendirilmektedir. Şekil 4.36'da akım ve gerilim trafosuna bağlı LDC yapısı görülmektedir [42].




Şekil 4.36. LDC Gerilim kontrolü yapısı

Esasen bu yapı regülatörün bağlı olduğu hat üzerindeki gerilim düşümünü oluşturan hat empedansını simüle etmektedir. Bu simülasyon çerçevesinde LDC kontrolör kademe değiştiriciye komut vererek regülasyon işlemi yapılır.

Burada regülatörün doğru çalışabilmesi için akım yönü tespiti önemli bir etkendir. Şayet şebekede bulunan herhangi bir üretim santrali sebebiyle hat akımının yönü kaynağa doğru değişirse, artan hat akımı ile regülatör üzerine düşen gerilim de artmaya başlayacaktır. Fakat klasik regülatör akım arttıkça gerilimin düşmesi gerektiğini değerlendirerek kademe ile gerilimi yükseltmeye çalışacaktır. Bu işlem regülatörü sonsuz döngüye sokarak son kademeye kadar gerilim yükseltmesi veya tersi durumda minimum kademeye kadar gerilimi alçaltması anlamına gelmektedir. İlaveten akımın yönüne göre gerilim referansını ölçeceği nokta değişmektedir. Regülatör düzeltme yapacağı gerilim referansını, enerji akış yönüne göre regülatörün çıkışından ölçmek durumundadır.

Bu sebeple regülatörler aşağıdaki çeşitli çalışma durumuna göre programlanarak devreye alınırlar. Bunlar;

- Düz çalışma
- Ters çalışma
- Çift yönlü çalışma (Bi-Directional)
- Reaktife bağlı çift yönlü çalışma
- Ters durumda nötr kalma
- Ters durumunda konum koruma
- Kojenerasyon çalışma

şeklindedir.

### 4.4.1. Düz/Ters çalışma

Regülatör bağlantı durumuna göre tek yönlü akımda çalışacak şekilde programlandığı durumlardır. Düz çalışma regülatörün yükün önüne, ters çalışma ise üretim kaynağının önüne konduğu durumlar için ayarlanır ve aksi durumda regülatör kademe değişimi yapmaz.

### 4.4.2. Çift yönlü çalışma

Regülatör her iki akım yönünde de regülasyon işlemi yapar. Bu özellikle dağıtıma gömülü enerji santrallerinin bulunduğu ve yükün zamana bağlı olarak azalıp çoğalmasıyla akım yönünün değiştiği durumlarda kullanılır.

### 4.4.3. Reaktife bağlı çift yönlü çalışma

Bu durum dağıtıma gömülü üretim santrallerinin bulunduğu ve santralin sabit cosΦ değerinde çalıştığı durum için değerlendirilmiştir. Burada üretim santrali devrede iken şebekeye aktif güç vermesi için şebekeden belirli bir miktarda reaktif güç çekmesi gerekmektedir. Regülatörün böyle bir konumda yük akışına göre regülasyon yapması için tasarlanmış bir program şeklidir.

### 4.4.4. Ters durumda nötr veya konum koruma

Bu çalışma şeklinde ters yönlü akım anormal bir yük akışının olduğunu ifade etmektedir. Bu sebeple regülatörün nötr konumuna gelmesi veya mevcut konumunu koruması istenebilir. Bu şekildeki yük akışı için uygulanacak programlama yapısını göstermektedir.

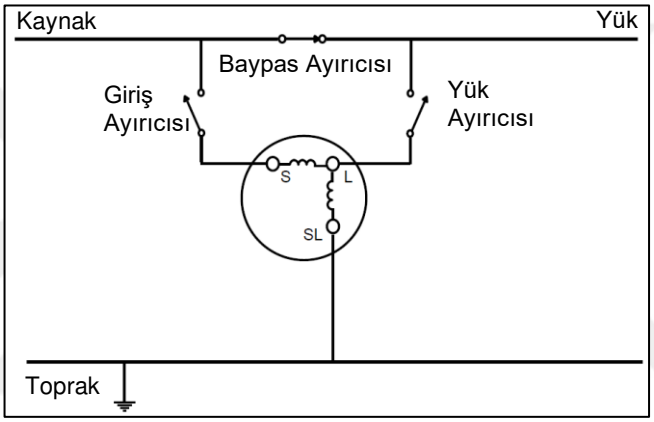
### 4.4.5. Kojenerasyon çalışma

Kojenerasyon santralleri öncelikli olarak iç ihtiyacı karşılamak için kullanılır. Fakat sisteme bağlı çalışması durumunda bazen şebekeye doğru enerji akışı olabilir. Regülatör bu durumdaki akışı tespit ederek yön değiştirmeden çalışmasına devam edecek şekilde programlama yapısını göstermektedir. Yani regülatörün sınırlı seviyelerde belirlenen ters yük akışlarına izin verebilecek şekilde programlanmasıdır.

### 4.5. Devreye Alma

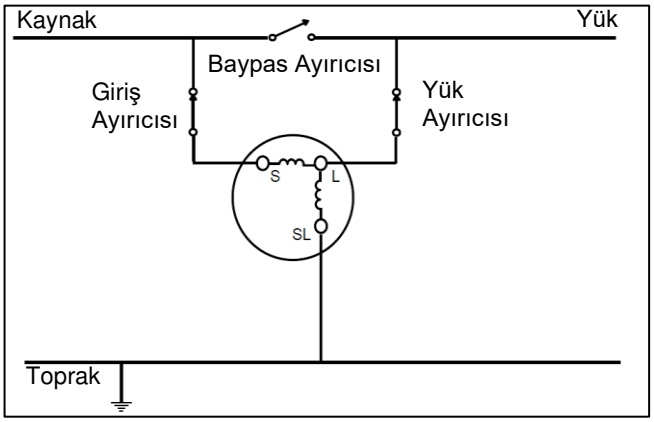
Montajı yapılan regülatörleri devreye almak veya devreden çıkarmak için dikkat edilmesi gereken işlem sıralaması gerekmektedir. Burada özellikle tüm işlemler regülatörün nötr konumunda yapılmalıdır. “0” kademesi regülatörün içinde giriş ile çıkışı birbirine bağlamaktadır. Dolayısıyla dışarıda da kolaylıkla baypas ayırıcıyı kapatabiliriz

Şekil 4.37’de devre dışı olan regülatör görülmektedir. Burada sırasıyla giriş ayırıcısı ve yük ayırıcısı kapatılabilir. Sonrasında baypas ayırıcıyı açılarak regülatörü devreye alabiliriz.




Şekil 4.37. Regülatör devre dışı

Şekil 4.38’de devreye alınan regülatörün durumu görülmektedir. Böylelikle regülatör yapacağı ölçümlere göre otomatik kademe değişmeye başlayacaktır.




Şekil 4.38. Regülatör devrede

Regülatörü devreden çıkarma işlem basamakları da devreye almanın tam tersidir. Nötr kademe sonrasında baypas kapatılarak yük ile giriş ayırıcıları açılabilir.

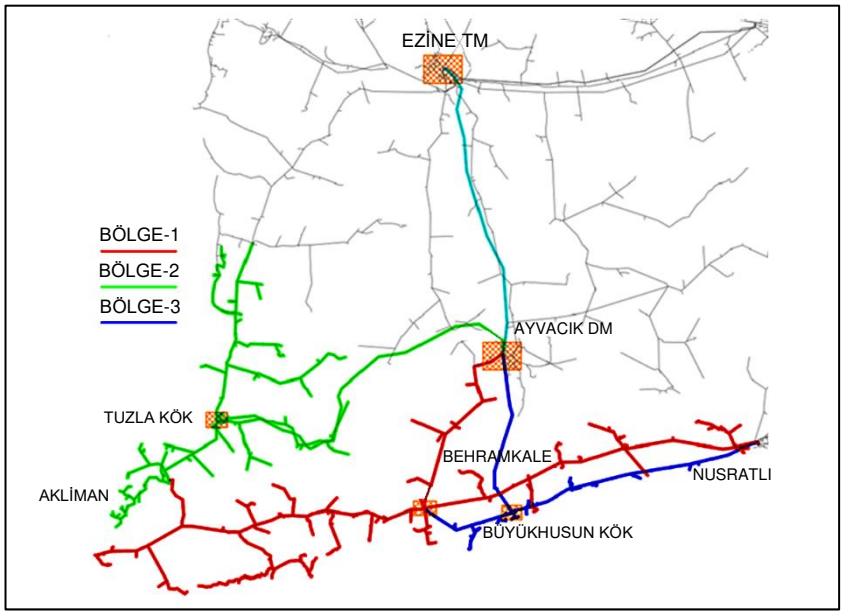
## 5. TUZLA KÖK OG ŞEBEKE UYGULAMASI

OG Gerilim regülatörü uygulama projesi EPDK tarafından kabul edilen ve UEDAŞ sorumluluk bölgesinde Ar-Ge projesi olarak hayata geçirilen bir uygulama projesidir. Projenin kabul edilmesi akabinde ilk olarak montaj için uygun nokta yeri tespit edilmiştir. Şebeke yapısına göre bilinen problemli bölgeler arasında gerekli analizler yapılarak en uygun noktadaki fiderin belirlenmesi sonrasında uygulama yapılmıştır.

### 5.1. Fider Tespit Çalışmaları

Dağıtım sisteminde gerilim regülasyonunu bozan önemli etkenlerden biri dağıtık üretim santrallerdir. Bu kapsamda regülatör uygulaması için Uludağ Elektrik Dağıtım AŞ sorumluluk sahasında bulunan Çanakkale il sınırlarında, jeotermal enerji üretim santrallerinin (JES) bulunduğu Ayvacık bölgesi incelenerek gerekli analizler yapılmıştır. Bu bölge özellikle dağıtık üretimin etkisiyle mevsimsel yüklenmeye bağlı olarak kendini gösteren gerilim değişimi problemlerinin yaşandığı bir bölgedir.

Öncelikle sistemin tek hat şemasına göre Ezine TM'den çıkan 8 adet fider içinden Ayvacık 2 fideri üzerinde gerekli analiz çalışmaları yapılmıştır. Ayvacık 2 fiderinin coğrafi bilgi sistemi üzerindeki dağılımı aşağıdaki Şekil 5.1'de görülmektedir. Burada, Ayvacık DM'den çıkan fiderler ise şekildeki gibi 3 bölgeye ayrılmaktadır.




Şekil 5.1. Ezine TM Ayvacık 2 fideri coğrafik modeli

Şekil 5.1'de gösterilen coğrafik model üzerinde;

- Bölge-1 Behramkale Kök'ün altında bulunan noktaları,
- Bölge-2 Tuzla Kök'ün altında bulunan noktaları,
- Bölge-3 Büyükhusun Kök'ün altında bulunan noktaları temsil etmektedir.

Bu bölgeleri kapsayan şebeke varlıkları Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Şebeke varlıkları

| Hat Tipi | Uzunluk (km) |
|---|---|
| 3xSW | 169,2 |
| 3(1x50+16) Cu | 0,256 |
| 3x1/0 | 49 |
| 3(1x70+16) Cu | 0,9 |
| 3(1x95+16) Cu | 2,7 |
| 3x3/0 | 136,74 |

Tablo 5.2'de ise bu bölgedeki trafoların sayıları ve güçleri bulunmaktadır.

Tablo 5.2. Trafo sayıları

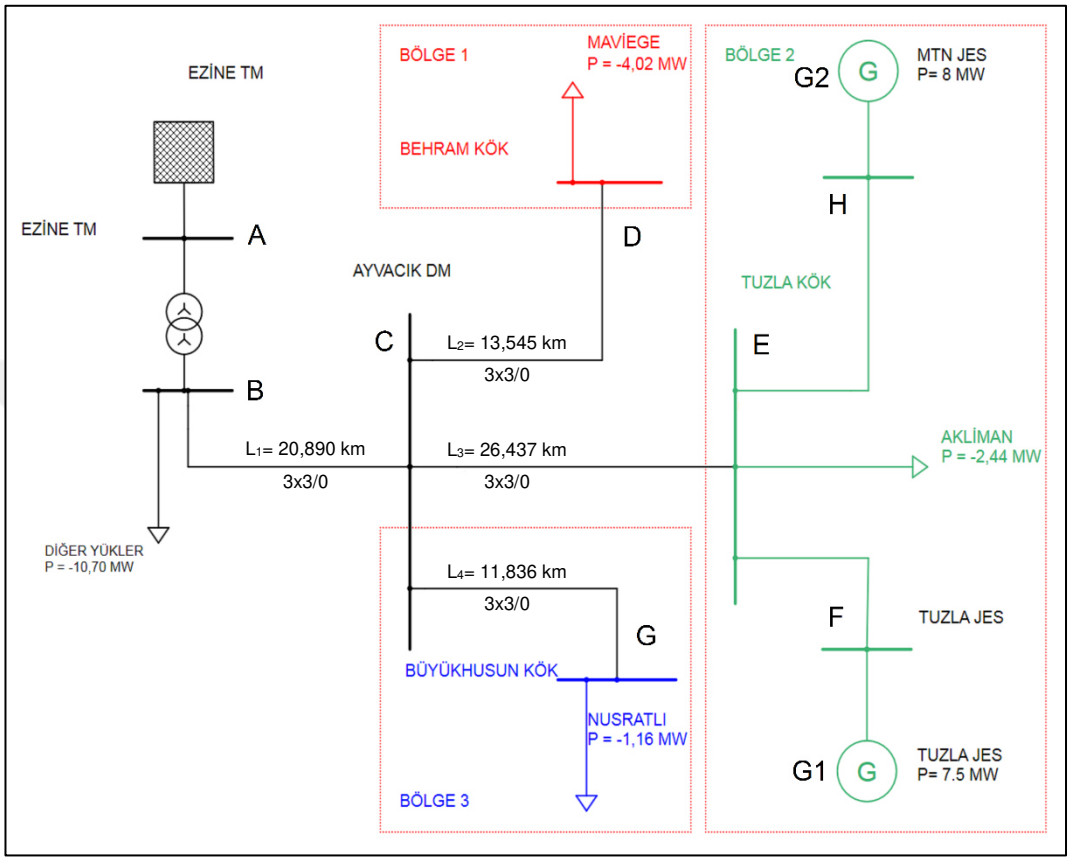
| Transformatör Gücü (kVA) | Adet |
|---|---|
| 25 | 11 |
| 50 | 102 |
| 100 | 61 |
| 160 | 42 |
| 250 | 25 |
| 400 | 14 |
| 1000 | 1 |
| 2500 | 1 |

Bu bilgiler ışığında sistem PSS Sincal programında modellenerek gerekli analiz işlemleri ile şebeke senaryolarına bağlı olarak yük akış analizleri yapılmıştır. Bu sonuçlara göre bara gerilimleri incelenmiş ve gerilim regülatörü için ihtiyaç duyulan noktanın belirlenmesine karar verilmiştir.

Ezine TM'de bulunan 25 MVA güç transformatörünün kademe değiştiricisi; fiderlerin şebeke nominal yüklenme gücü olarak kabul edilen %100 puant yük olan 18,2 MW yükte, sekonder bara gerilimini 34,5 kV nominal seviyede olması için primer tarafta +2. kademeye (%1,25x2) ayarlanarak gerekli analizler yapılmıştır. Bu analizlerin işlem basamakları ve alınan sonuçlar şebeke analizleri kısmında gösterilmiştir.

## 5.2. Şebeke Analizleri

OG Regülatör için incelenecek Ayvacık 2 fiderinin tek hat şeması Şekil 5.2'de gözükmektedir.




Şekil 5.2. Ezine TM Ayvacık 2 fideri tek hat şeması

Buradaki şebeke elemanları aşağıdaki gibidir;

A : Ezine TM TR A Primer Barası (154 kV)

B : Ezine TM TR A Sekonder Barası (34,5 kV)

C : Ayvacık DM

D : Behramkale KÖK

E : Tuzla KÖK

F : Tuzla JES Barası

H : MTN JES Barası

G : Büyükhusun KÖK

G1 : Tuzla JES

G2 : MTN JES

İncelenen tek hat şemasına göre yük akış analizlerinde sistemin en son baralarında test edilmiştir. Bunlar, Tablo 5.3'te gösterildiği gibi dağıtık üretimin devrede olmadığı ve şebekenin maksimum yüklendiği durum ile dağıtım üretimin devrede olduğu ve şebekenin boşta çalıştığı toplam 8 adet senaryodan oluşturmaktadır.

Tablo 5.3. Analiz senaryoları

| | Yüklenme Koşulları | Dağıtık Üretim |
|---|---|---|
| 1. Senaryo | %100 | - |
| 2. Senaryo | %100 | + |
| 3. Senaryo | %50 | - |
| 4. Senaryo | %50 | + |
| 5. Senaryo | %0 | - |
| 6. Senaryo | %0 | + |
| 7. Senaryo | %120 | - |
| 8. Senaryo | %120 | + |

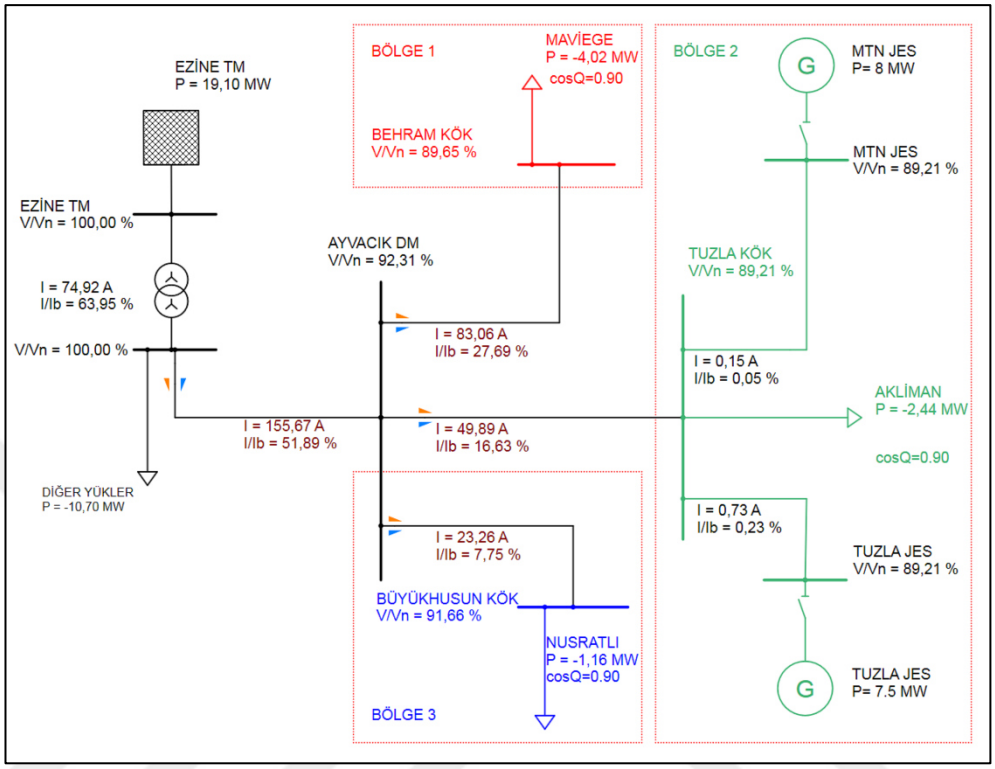
Tablo 5.3'te görülen yüklenme koşulları ve dağıtık üretim birimleri için farklı senaryolar aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

- 1. senaryo: %100 yüklenme ve santrallerin (-) devrede olmadığı durum.
- 2. senaryo: %100 yüklenme ve santrallerin (+) devrede olduğu durum.
- 3. senaryo: %50 yüklenme ve santrallerin (-) devrede olmadığı durum.
- 4. senaryo: %50 yüklenme ve santrallerin (+) devrede olduğu durum.
- 5. senaryo: %0 yüklenme ve santrallerin (-) devrede olmadığı durum.
- 6. senaryo: %0 yüklenme ve santrallerin (+) devrede olduğu durum.
- 7. senaryo: %120 yüklenme ve santrallerin (-) devrede olmadığı durum.
- 8. senaryo: %120 yüklenme ve santrallerin (+) devrede olduğu durum.

İlgili senaryolarda belirtilen yüklenme ve dağıtık üretim birimlerinin devrede olması veya olmaması durumları, PSS Sincal şebeke analiz programında simüle edilmiştir. Çalıştırılan yük akış analizleri ve sonucu baralardaki gerilim düşümleri ve hat kayıpları incelenmiş ve yaptığımız bu senaryoların analiz sonuçları sırasıyla aşağıda gösterilmiştir.

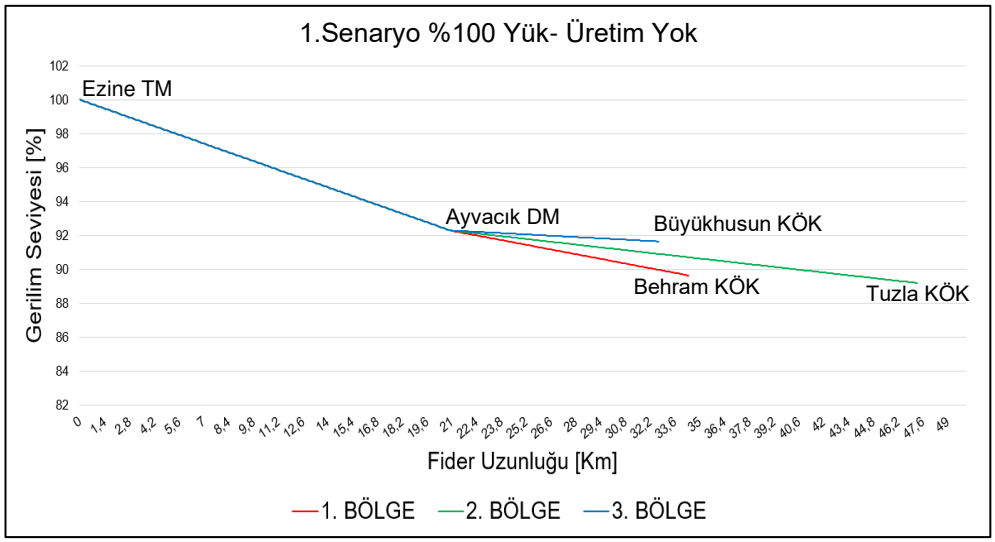
### 5.2.1. 1. senaryo %100 yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum

Bu senaryonun yük akış analizi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.




Şekil 5.3. %100 Yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum analizi

1. senaryo için toplam hat kayıpları 762 kW olarak hesaplanmıştır.

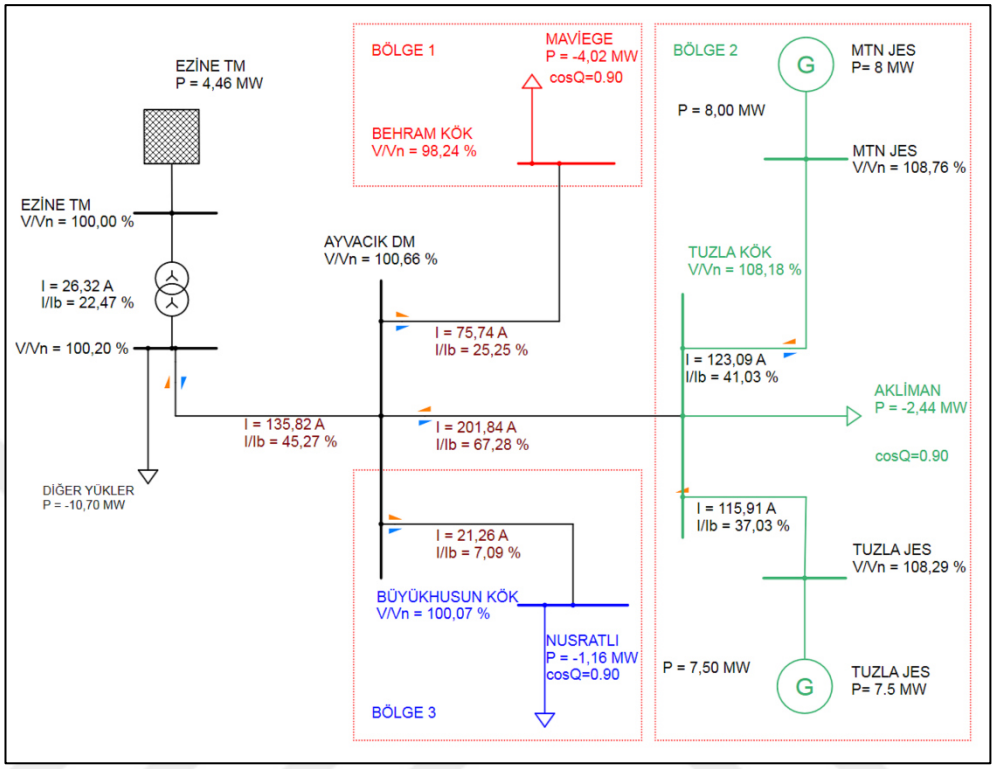



Şekil 5.4. 1. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri

Şekil 5.4'teki 1. senaryo incelendiğinde 1. bölgede gerilim %89,65, 2. bölgede %89,21 ve 3. bölgede %91,66 olduğu gözlemlenmiştir.

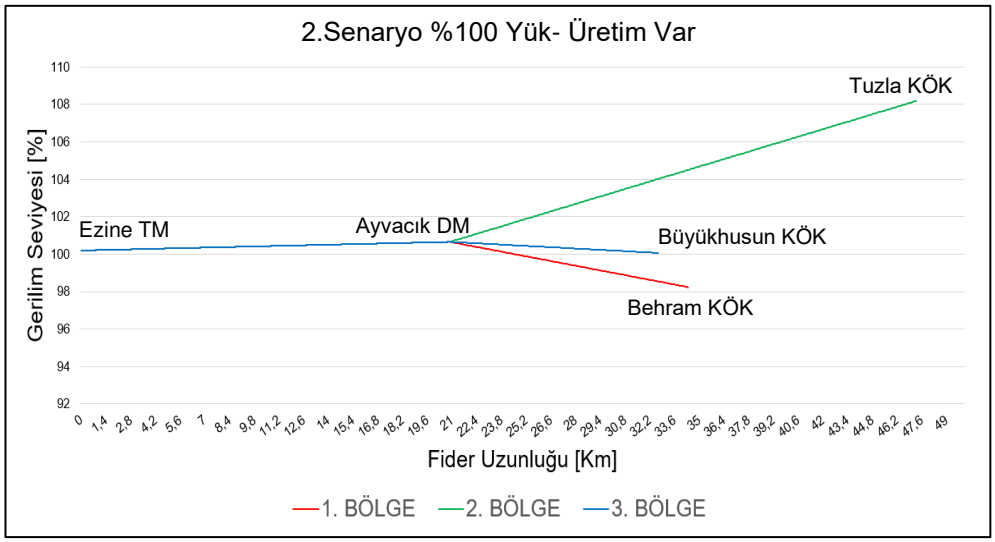
### 5.2.2. 2. senaryo %100 yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum

Bu senaryonun yük akış analizi Şekil 5.5'te gösterilmiştir.




Şekil 5.5. %100 Yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum analizi

2. senaryo için toplam hat kayıpları 1625 kW olarak hesaplanmıştır.

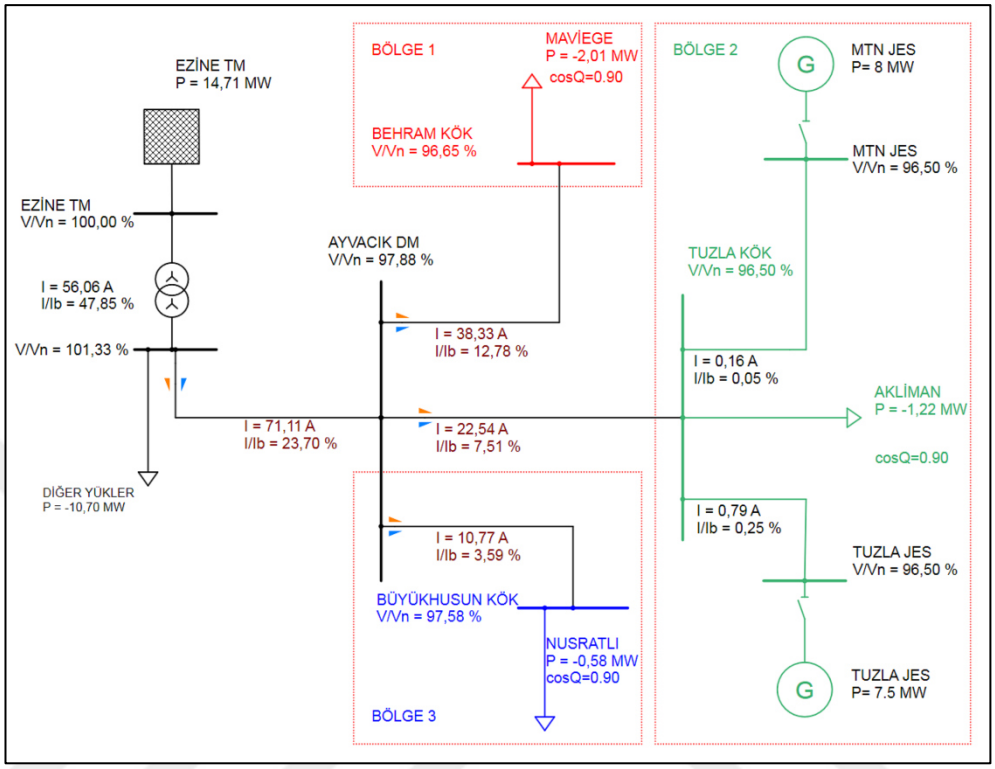



Şekil 5.6. 2. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri

Şekil 5.6'daki 2. senaryo incelendiğinde 1. bölgede gerilim %98,24, 2. bölgede %108,18 ve 3. bölgede %100,07 olduğu gözlemlenmiştir.

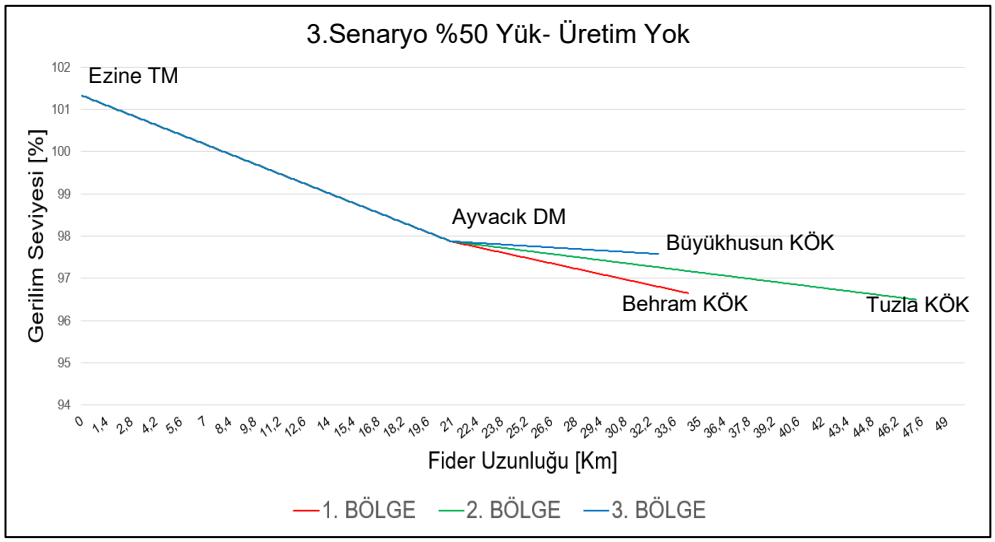
### 5.2.3. 3. senaryo %50 yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum

Bu senaryonun yük akış analizi  Şekil 5.7'de gösterilmiştir.




Şekil 5.7. %50 Yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum analizi

3. senaryo için hat kayıpları 188 kW olarak hesaplanmıştır.

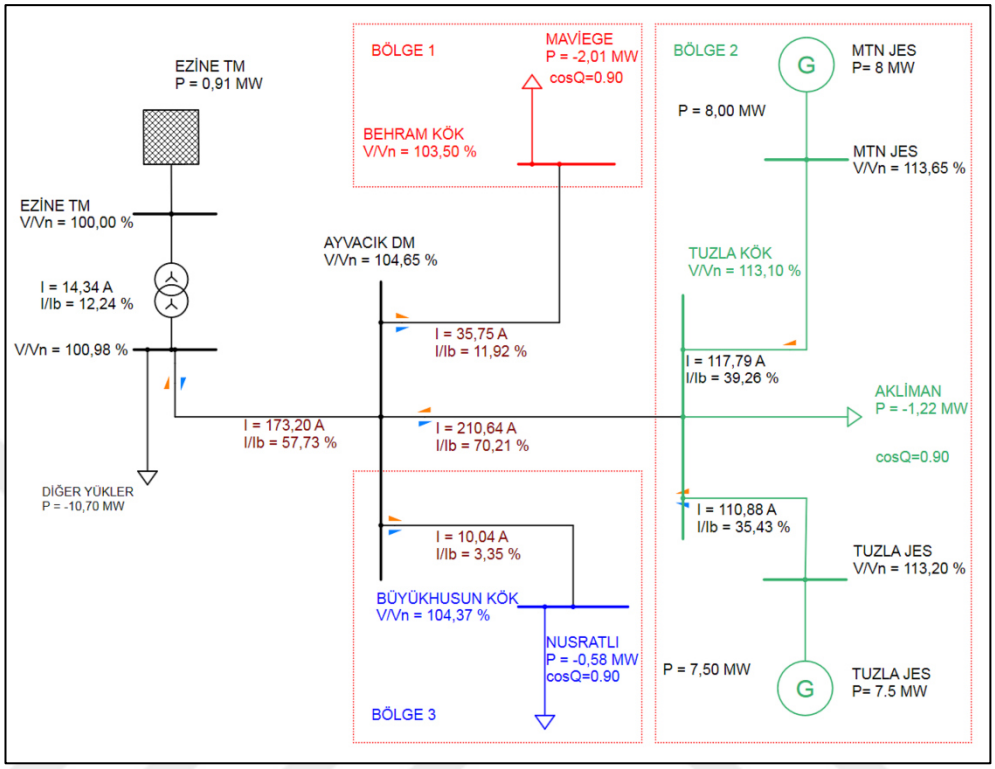



Şekil 5.8. 3. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri

Şekil 5.8'deki 3. senaryo incelendiğinde 1. bölgede gerilim %96,65, 2. bölgede %96,5 ve 3. bölgede %97,58 olduğu gözlemlenmiştir.

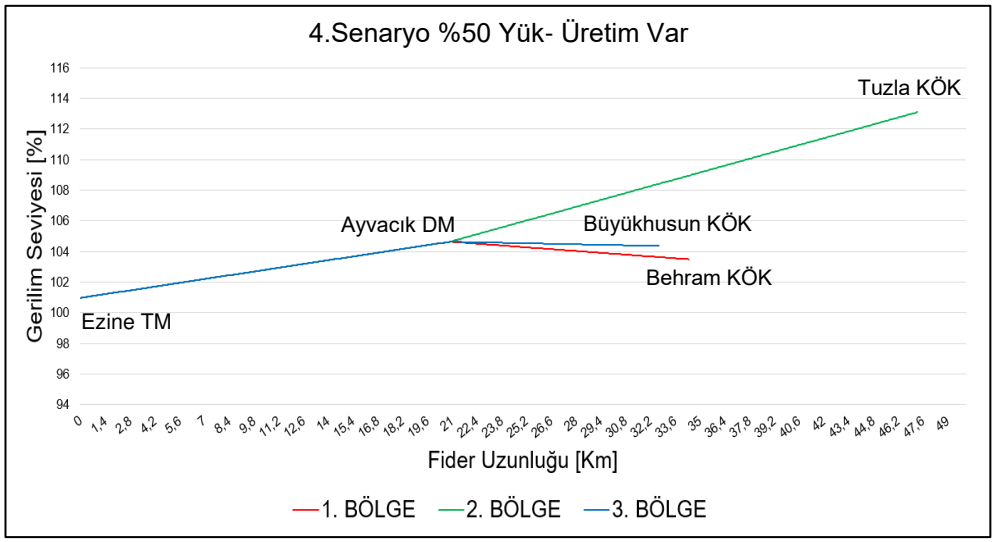
### 5.2.4. 4. senaryo %50 yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum

Bu senaryonun yük akış analizi Şekil 5.9'da gösterilmiştir.




Şekil 5.9. %50 Yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum analizi

4. senaryo için hat kayıpları 1888 kW olarak hesaplanmıştır.

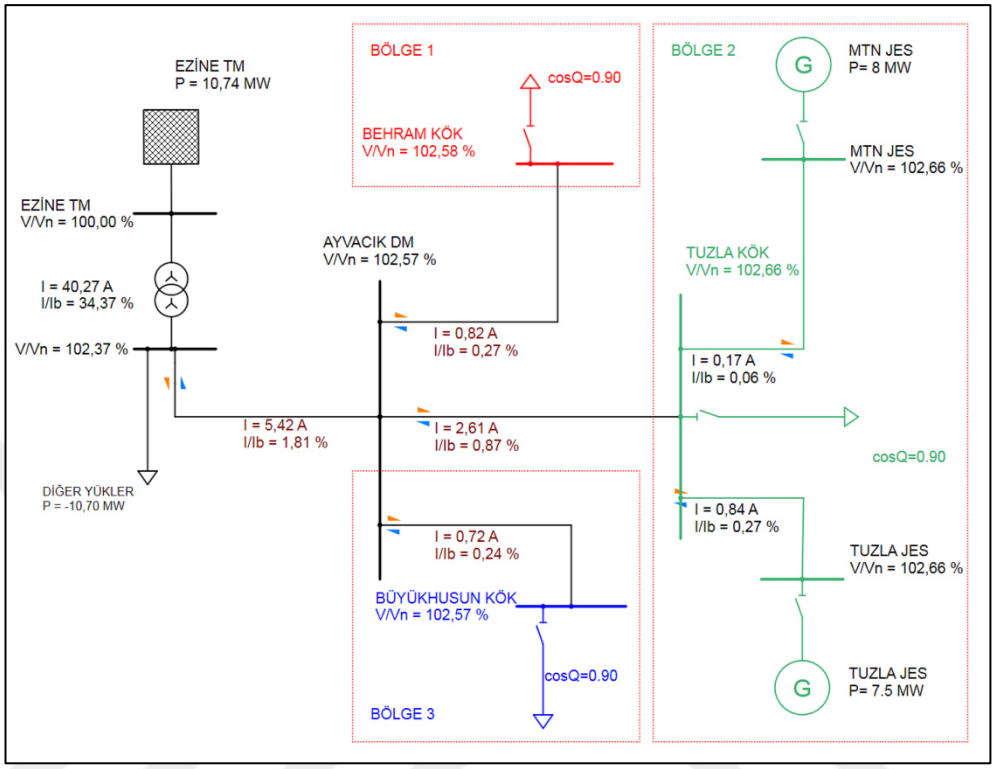



Şekil 5.10. 4. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri

Şekil 5.10'daki 4. senaryo incelendiğinde 1. bölgede gerilim %103,5, 2. bölgede %113,1 ve 3. bölgede %104,37 olduğu gözlemlenmiştir.

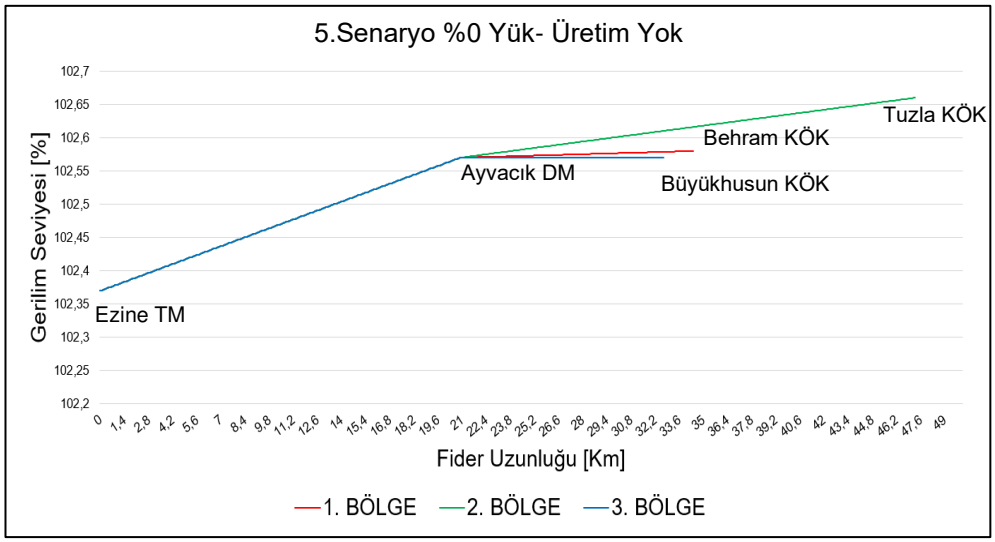
### 5.2.5. 5. senaryo %0 yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum

Bu senaryonun yük akış analizi Şekil 5.11'de gösterilmiştir.




Şekil 5.11. %0 Yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum analizi

5. senaryo için hat kayıpları 24 kW olarak hesaplanmıştır.

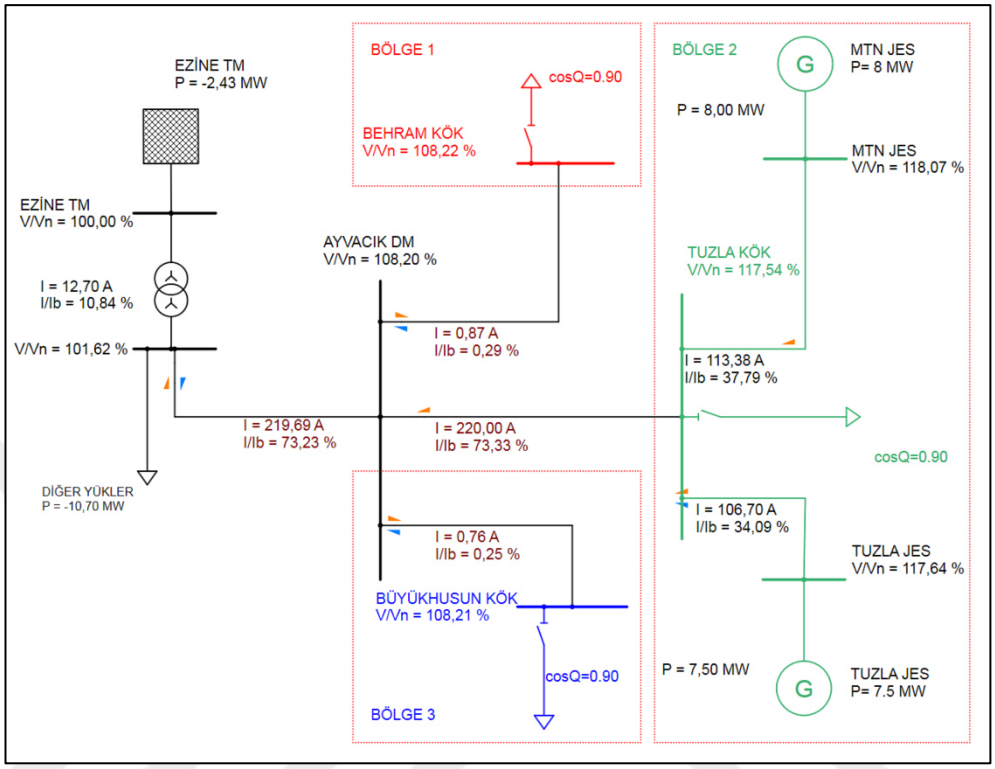



Şekil 5.12. 5. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri

Şekil 5.12'deki 5. senaryo incelendiğinde 1. bölgede gerilim %102,58, 2. bölgede %102,66 ve 3. bölgede %102,57 olduğu gözlemlenmiştir.

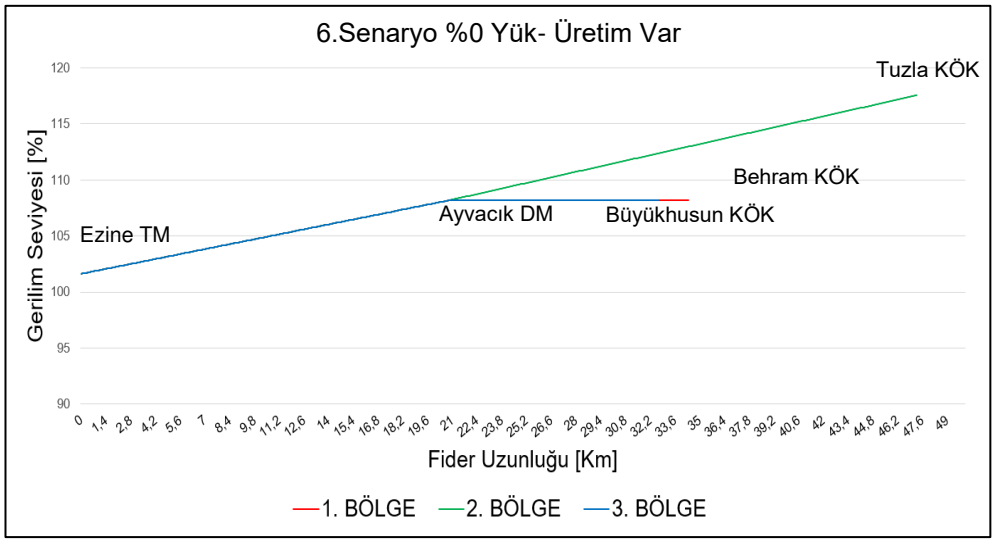
### 5.2.6. 6. senaryo %0 yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum

Bu senaryonun yük akış analizi Şekil 5.13'te gösterilmiştir.




Şekil 5.13. %0 Yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum analizi

6. senaryo için hat kayıpları 2358 kW olarak hesaplanmıştır.

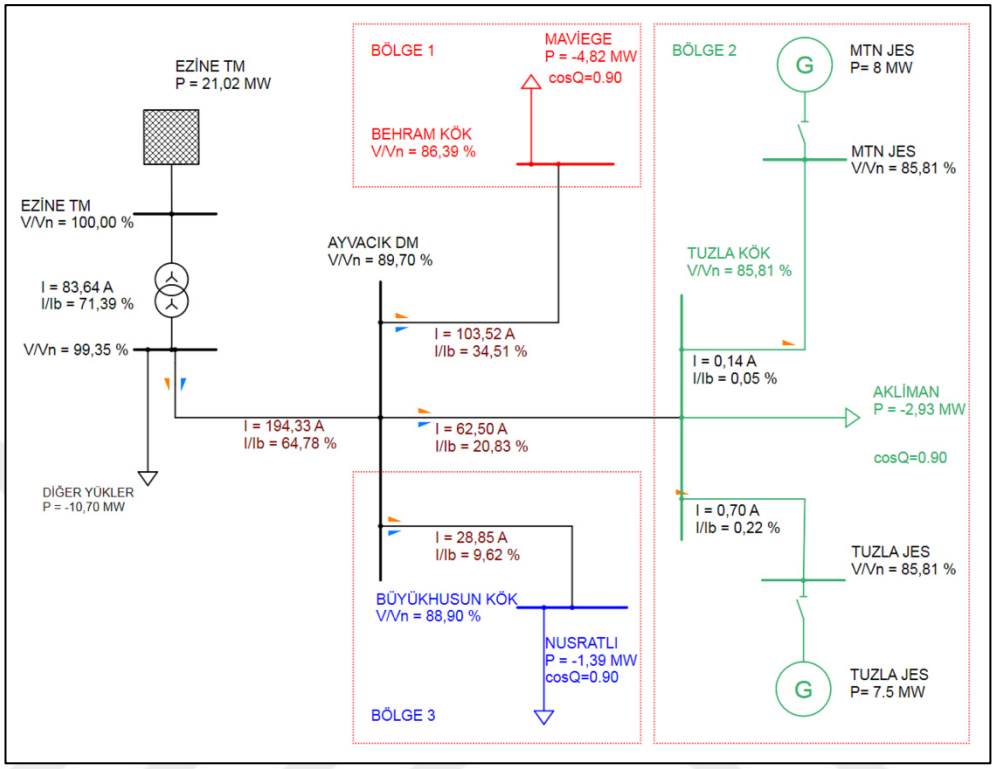



Şekil 5.14. 6. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri

Şekil 5.14'teki 6. senaryo incelendiğinde 1. bölgede gerilim %108,22, 2. bölgede %117,54 ve 3. bölgede %108,21 olduğu gözlemlenmiştir.

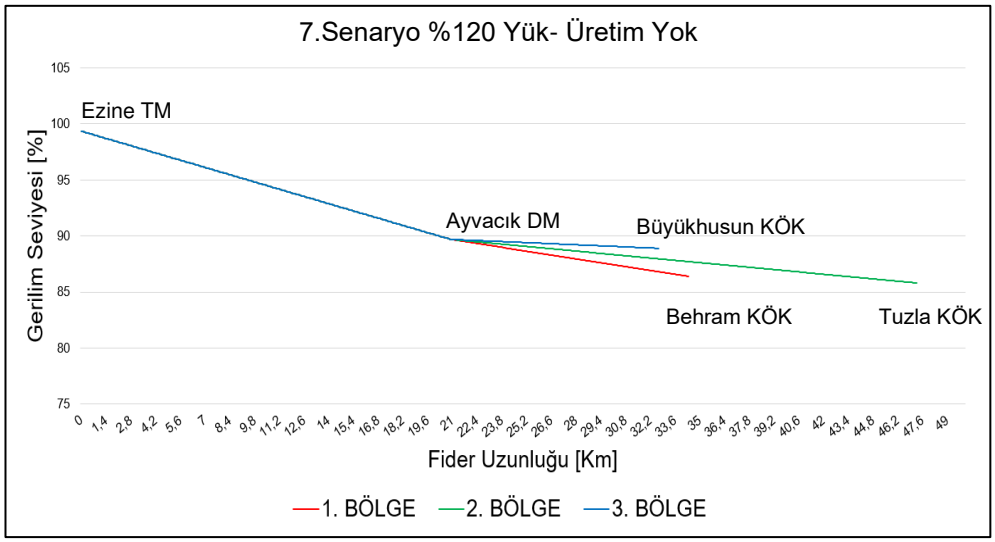
### 5.2.7. 7. senaryo %120 yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum

Bu senaryonun yük akış analizi Şekil 5.15'te gösterilmiştir.




Şekil 5.15. %120 Yüklenme ve DÜ devrede olmadığı durum analizi

7. senaryo için hat kayıpları 1162 kW olarak hesaplanmıştır.

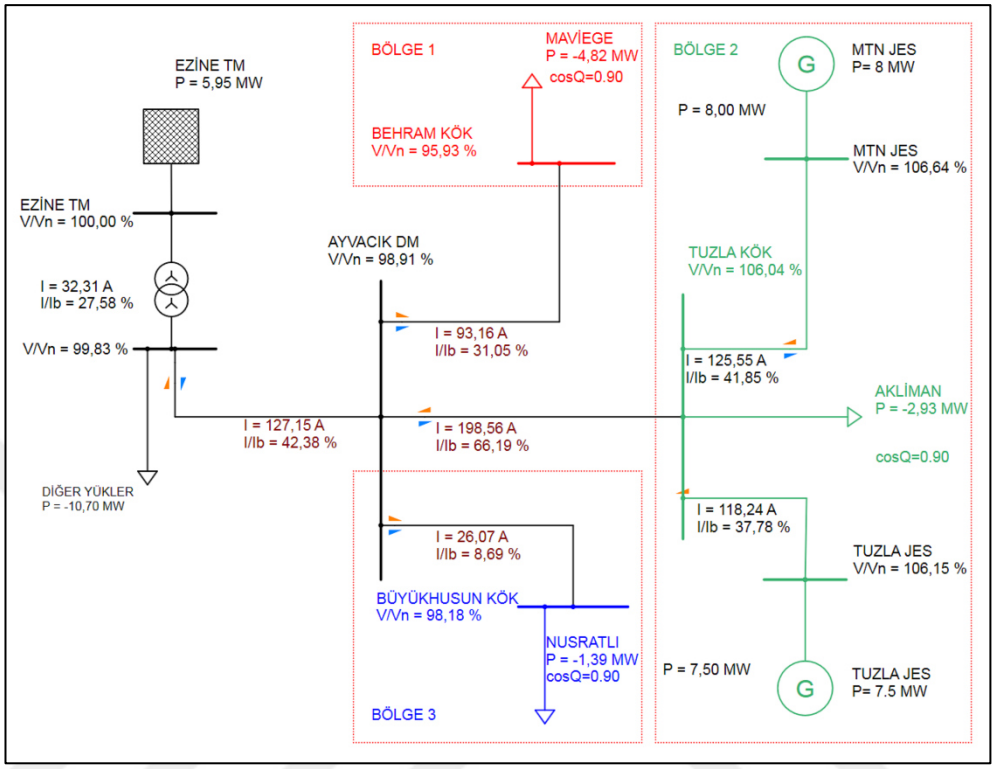



Şekil 5.16. 7. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri

Şekil 5.16'daki 7. senaryo incelendiğinde 1. bölgede gerilim %86,39, 2. bölgede %85,81 ve 3. bölgede %88,9 olduğu gözlemlenmiştir.

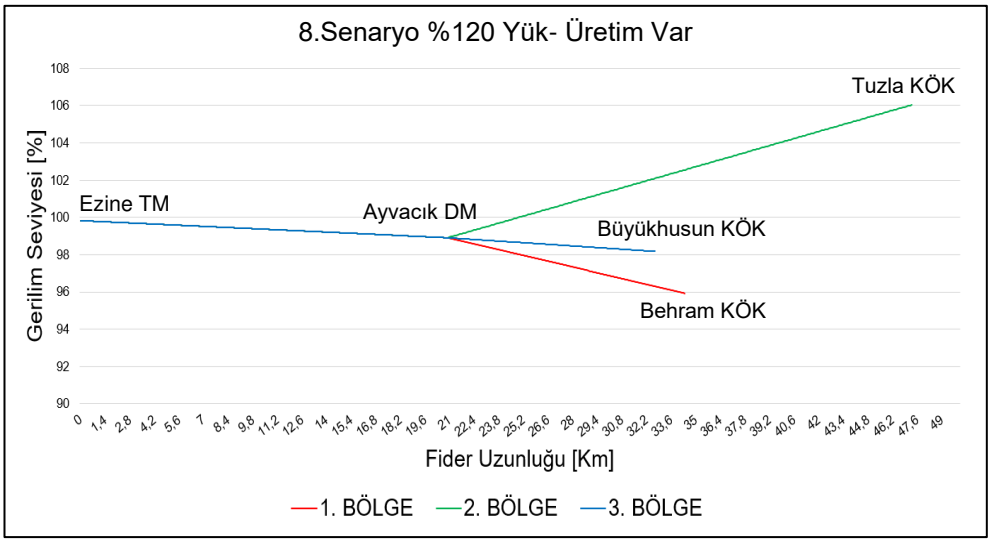
### 5.2.8. 8. senaryo %120 yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum

Bu senaryonun yük akış analizi Şekil 5.17'de gösterilmiştir.




Şekil 5.17. %120 Yüklenme ve DÜ devrede olduğu durum analizi

8. senaryo için hat kayıpları 1592 kW olarak hesaplanmıştır.




Şekil 5.18. 8. senaryo durumunda bölgelerdeki gerilim grafikleri

Şekil.5.18'deki 8. senaryo incelendiğinde 1. bölgede gerilim %95,93, 2. bölgede %106,04 ve 3. bölgede %98,18 olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan tüm şebeke analizlerinin sonuçları derlendiğinde alınan sonuçları aşağıdaki Tablo 5.4'te gösterilmektedir. Bu analizlerden özellikle 1. ve 7. senaryoda gerilim düşümü problemleri ve 4. ve 6. senaryoda gerilim yükselmesi problemleri oluştuğu ve yönetmeliğin belirlediği değerlerin dışına çıkıldığı görülmektedir.

Tablo 5.4. Analiz sonuç tablosu

| | Yüklenme Koşulları | Dağıtık Üretim | Hat Kaybı | 1. Bölge | 2. Bölge | 3. Bölge |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. Senaryo | 100% | - | 762 | 89,65% | 89,21% | 91,66% |
| 2. Senaryo | 100% | + | 1625 | 98,24% | 108,18% | 100,07% |
| 3. Senaryo | 50% | - | 188 | 96,65% | 96,50% | 97,58% |
| 4. Senaryo | 50% | + | 1888 | 103,50% | 113,10% | 104,37% |
| 5. Senaryo | 0% | - | 24 | 102,58% | 102,66% | 102,57% |
| 6. Senaryo | 0% | + | 2358 | 108,22% | 117,54% | 108,21% |
| 7. Senaryo | 120% | - | 1162 | 86,39% | 85,81% | 88,90% |
| 8. Senaryo | 120% | + | 1592 | 95,93% | 106,04% | 98,18% |

Görüldüğü üzere hat kayıpları 2358 kW'a kadar çıkmakta, gerilim değişimleri %85,81 ila %117,54 arasında yük durumuna ve dağıtık üretimin devrede olması durumuna göre değiştiği görülmektedir. Tablo 5.4'te yaptığımız inceleme sonucu özellikle 2. bölgede önemli gerilim regülasyon problemleri olduğu görülmüştür.

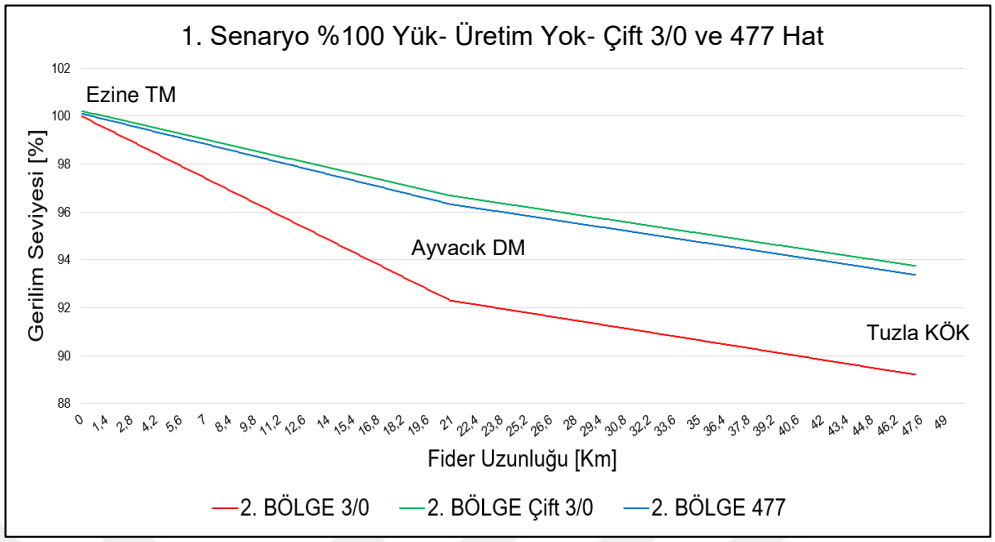
### 5.3. Şebeke İyileştirmeleri

Yapılan analizler sonucu ortaya çıkan 1. ve 7. senaryolar için hat sonundaki gerilim seviyelerinin düşük olmasının sebebi hat kayıplarıdır. Bilindiği gibi hatlardan akan akımların artması ile birlikte mevcut hattın empedansına bağlı olarak hat kayıpları da artmaktadır. Analizini yaptığımız şebeke kısmında bu problemleri gidermek için öncelikli çözüm yeni bir hat yatırımı yapmaktır. Bu çözüm sonucunu incelemek amacıyla Ezine TM'den gelene 3x3/0 AWG (pigeon) kesitindeki iletkenleri yenilediğimiz durumlar için de gerekli analizleri yapılmıştır.

Bunun için;

- 1.Durum: L1 Ayvacık 2 fiderinin 3x3/0 yerine 3x477 MCM hat ile değiştirilmesi;
- 2.Durum: L1 Ayvacık 2 fideri hattının tek devre 3x3/0 AWG yerine çift devre 3x3/0 hat ilave edilmesi durumları için gerilim profilinin düzelmesi incelenmiştir.

1. senaryoda Bölge 2 için gerilim profili Şekil 5.19'da verilmiştir.

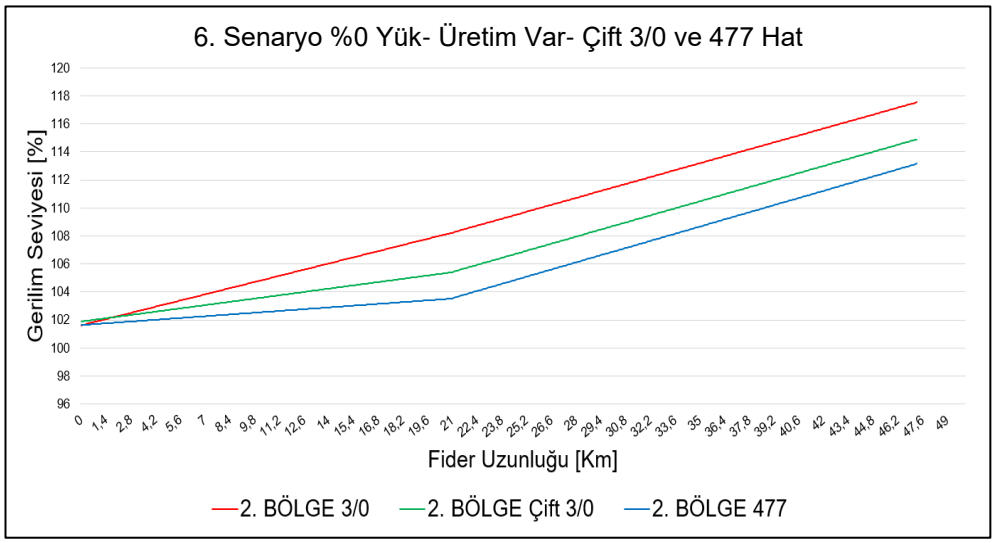



Şekil 5.19. 1. senaryo Bölge 2'de yatırım sonucu gerilim grafikleri

Mevcut 3x3/0 AWG hat yerine 3x477 MCM hattın çekilmesi ile 2. bölgede hat sonundaki gerilim %89,21'den %93,38'e değerine çıktığı görülmektedir. Ayrıca mevcut tek devre 3x3/0 AWG hattın çift devre düzeninde kullanılması ile hat sonundaki gerilim seviyesi ise %93,75'e kadar çıktığı görülmektedir.

İlgili bölgedeki hat kayıpları incelendiğinde ise 763 kW olan kayıp değeri, 1. durum için 397 kW'a, 2. durum için 461 kW'a düştüğü hesaplanmıştır. Dolayısıyla yapılacak bu iyileştirme bu bölge için uygun bir çözüm olarak gözükmektedir.

6. senaryoda 2. bölge için gerilim profili Şekil 5.20'de verilmiştir.




Şekil 5.20. 6. senaryo Bölge 2'de yatırım sonucu gerilim grafikleri

Mevcut 3x3/0 AWG hat yerine 3x477 MCM hattın çekilmesi ile hat sonundaki gerilim %117,54'den %113,15 değerine düştüğü görülmektedir. Ayrıca mevcut tek devre 3x3/0 AWG hattın çift devre düzeninde kullanılması ile hat sonundaki gerilim seviyesinin %114,9 değerine düştüğü görülmektedir.

İlgili bölgedeki hat kayıpları ise 1162 kW olan kayıp değeri, 1. durum için 578 kW'a, 2. durum için 673 kW'a düştüğü hesaplanmıştır.

Fakat bu değerler yine istenilen teknik kalite değerlerinin dışında kalmaktadır. Buradan çıkan sonuçla yeni hat yatırımı gerilim yükselmesine karşın bir çözüm sağlamamaktadır.

Bununla birlikte yatırım maliyetleri karşılaştırıldığında 2018 yılı için yatırım maliyetleri aşağıdaki şekilde karşılaştırılmıştır.

2018 TEDAŞ birim fiyatlarına göre yeni çift devre 3/0 AWG demir direkli hat maliyeti 153.037,71 TL/km olarak hesaplanmıştır.

21 km toplam Ayvacık 2 fideri için 153.037,71x21= 3.213.791,91 TL hesaplanmıştır.

2018 TEDAŞ birim fiyatlarına göre yeni 477 MCM demir direkli hat maliyeti; 371.121,27 TL/km olarak hesaplanmıştır.

21 km toplam Ayvacık 2 fideri için; 371.121,27 x21= 7.793.546,67 TL olmaktadır.

2018 Temmuz dolar kuru ile SVR yaklaşık maliyeti: 92.000$x4,67 =430.000 TL'dir.

Aynı dönem 154/34,5 25 MVA TM yaklaşık maliyeti: 2,5M$x4,67=11.675.000 TL'dir.

Görüldüğü üzere gerek yatırım maliyeti gerekse gerilim yükselmesinde yetersiz kalması sebebiyle ilgili noktada gerilim regülatörü kullanılması uygun bir çözüm olarak gözükmektedir. Bu sebeple ekonomik ömrünü henüz doldurmamış uzun hatlarda oluşan gerilim problemlerine ekonomik bir çözüm olarak değerlendirebiliriz.

### 5.4. Gerilim Regülatörünün Yerinin Belirlenmesi Çalışması

Sistemde kullanılacak gerilim regülatörlerinin maksimum verimde kullanılabilmesi için tesis edilecek noktanın ve kademe sayılarının belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Bunun için dünyada kabul görmüş optimum gerilim regülatörü yeri belirleme metodolojisi aşağıdaki gibidir.

En uygun konum ve kademenin belirlenmesi analizi temelde iki aşamadan oluşmaktır.

1) Gerilim regülatörü için ön şartları sağlayan konumların ve gerilim regülatörü sayısının belirlenmesi;

2) Gerilim regülatörü sayısının optimizasyonunun yapılması, aşamalarından oluşmaktadır.

Bu aşamaları aşağıdaki başlıklarda açıklayabiliriz.

### 5.4.1. Yük akışı

Yük akışı sonuçları mevcut şebeke şartlarını belirlemede ve gerilim regülatörü konumlarının tespitinde değerlendirilebilecek en temel veriler olacaktır. Bunun sonucu, şebeke üzerinde gerilim düşümü açısından zayıf olan nokta veya bölgelerin tespitinde kullanılmaktadır. Aynı zamanda dağıtık üretim birimlerinin devreye girmesiyle oluşacak gerilim yükselmesi problemleri de görülecektir.

### 5.4.2. Kritik bölgelerin belirlenmesi

Gerilim regülatörü yerleştirme algoritmasına başlamadan önce yük akış analizleri yapılarak sistemin durumu belirlenir ve tüm baralardaki gerilim seviyeleri kaydedilir. Belirlenen sınır değerler dışında kalan noktalar ile TM arasındaki güzergâhlar kritik güzergâh olarak isimlendirilir. Daha sonra bu kritik güzergâh üzerinde uygun noktanın tespiti için gerekli çalışmalar yapılır.

### 5.4.3. En uygun konumun belirlenmesi için fonksiyon uygulanması

Gerilim düşümü ve şebeke kaybı kısıtlamaları niteliğinde yüzdesel faktörler olarak ifade edilebilmektedir. Bu faktörler her bir gerilim regülatörü konfigürasyonu için tekrar hesaplanmalıdır.

Gerilim düşümü faktörü Denklem (5.1)'de;

$$Fat_v\% = \frac{\sum_{i=1}^{N} (V_{nom} - V_i^f)^2}{\sum_{i=1}^{N} (V_{nom} - V_i^0)^2} x100 \qquad (5.1)$$

şeklindedir [19]. Burada N bara sayısı, $V_{nom}$ Sistem nominal gerilimi, $V_i^0$ gerilim regülatöründen önce bara gerilimi, $V_i^f$ gerilim regülatöründen sonra bara gerilimini ifade etmektedir.

Hat kaybı faktörü Denklem (5.2)'de,

$$Fat_p\% = \frac{\sum_{i=1}^{M} PL_j^{\,f}}{\sum_{i=1}^{M} PL_j^{\,0}} x100 \qquad (5.2)$$

şeklinde gösterilmiştir. Burada M Hat sayısı, $PL_j^{\,0}$ Gerilim regülatöründen önce hat kaybı, $PL_j^{\,f}$ gerilim regülatöründen sonra hat kaybını ifade etmektedir.

Gerilim düşümü ve hat kaybı faktörleri kullanılarak en uygun gerilim regülatörü konumu belirlemek amaçlı fonksiyon Denklem (5.3)'teki gibi yazılabilir.

$$FT = pv \times Fat_v\% + pp \times Fat_p\% \qquad (5.3)$$

pv ve pp katsayıları yapılacak analizde gerilim regülasyonu veya kayıp regülasyonu konusunda ağırlık belirtmektedir.

pv=1 ve pp=0 ise en uygun gerilim regülatörü belirleme analizlerinde sadece gerilim düşümü kriteri göz önünde bulundurulacaktır.

pv=0 ve pp=1 ise en uygun gerilim regülatörü belirleme analizlerinde sadece hat kaybı kriteri göz önünde bulundurulacaktır.

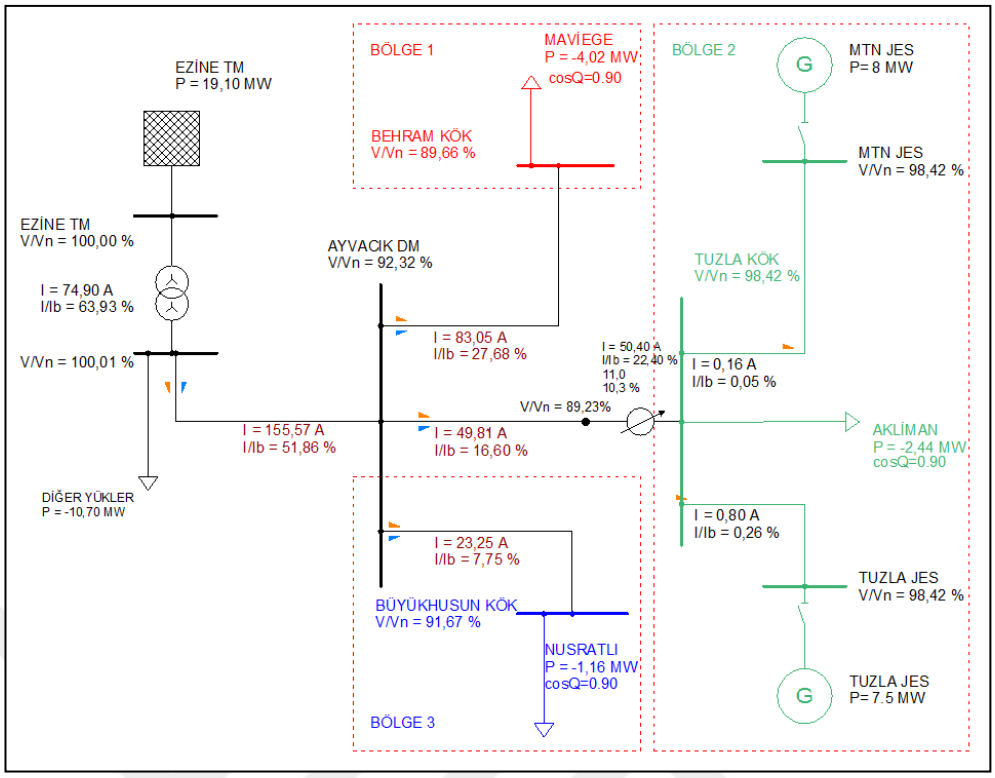
pv=0,5 ve pp=0,5 ise en uygun gerilim regülatörü belirleme analizlerinde her iki kriterde eşit oranda önem sahibi olacaktır.

FT her bir gerilim regülatörü konfigürasyonu için hesaplanır ve en küçük değere ulaşılan konfigürasyon optimum konfigürasyon olarak kullanılmaktadır.

### 5.4.4. UEDAŞ bölgesinde regülatör yer tespiti

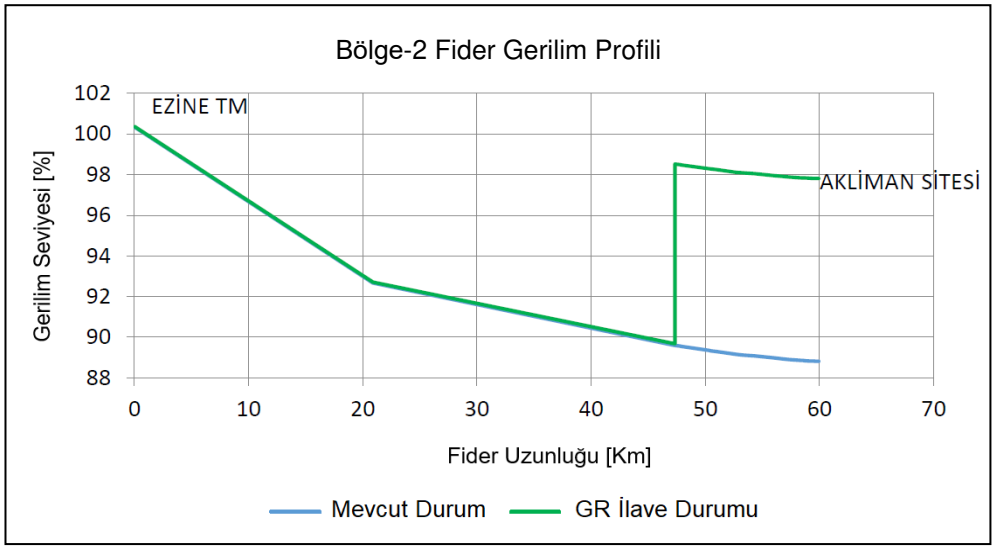
Yapılan analizler sonucu şebeke yapısı incelenmiş olup Tuzla Köke gerilim regülatörü yerleştirilmesi uygun bulunmuştur. Analizler L3 hattının 26,89 km'sinde bulunan Tuzla Kök'e gerilim regülatörü ilave edilerek gerçekleştirilmiştir.

1. senaryo sonucu hat %100 yüklü ve dağıtık üretim santralleri devrede değilken L3 hattının 26,89 km'sine (Tuzla Kök'e) gerilim regülatörünün ilave edilerek oluşan yeni yüklenme oranları ve hat akımları Şekil 5.21'de verilmiştir.




Şekil 5.21. 1. senaryo gerilim regülatörü ilavesiyle yük analizi

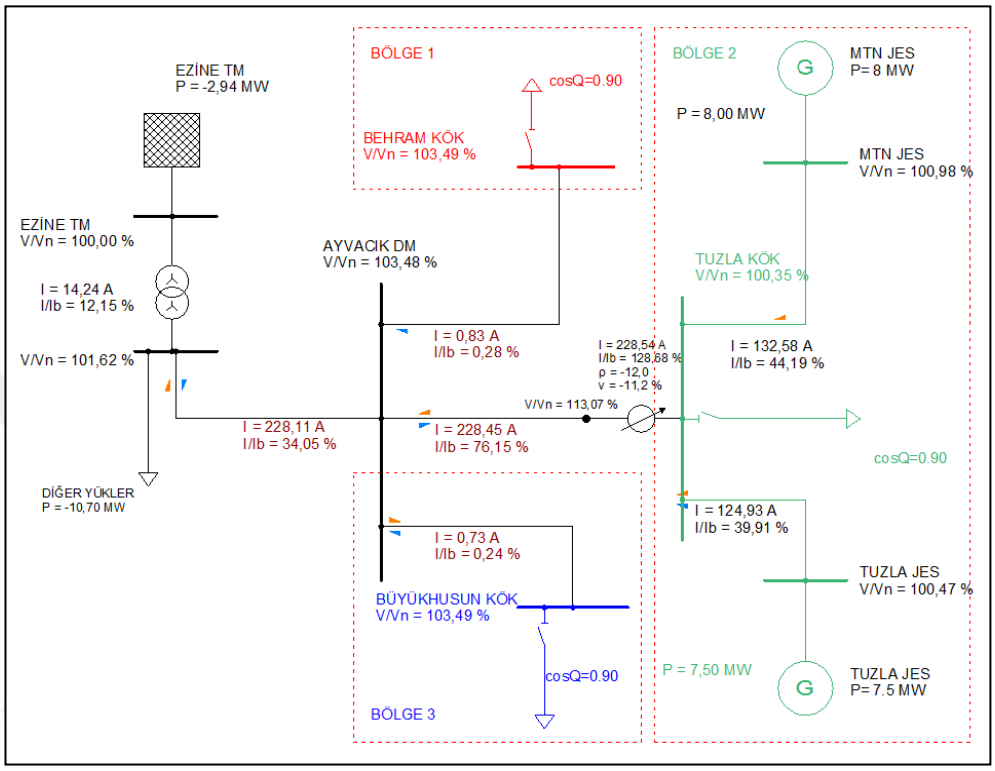
1. senaryoya regülatör ilavesiyle oluşan hat kayıpları 680 kW olarak hesaplanmıştır. Bu durumda 1. senaryo Bölge 2 için gerilim profili Şekil 5.22'de verilmiştir.




Şekil 5.22. 1. senaryoda OG regülatör sonrası gerilim profili

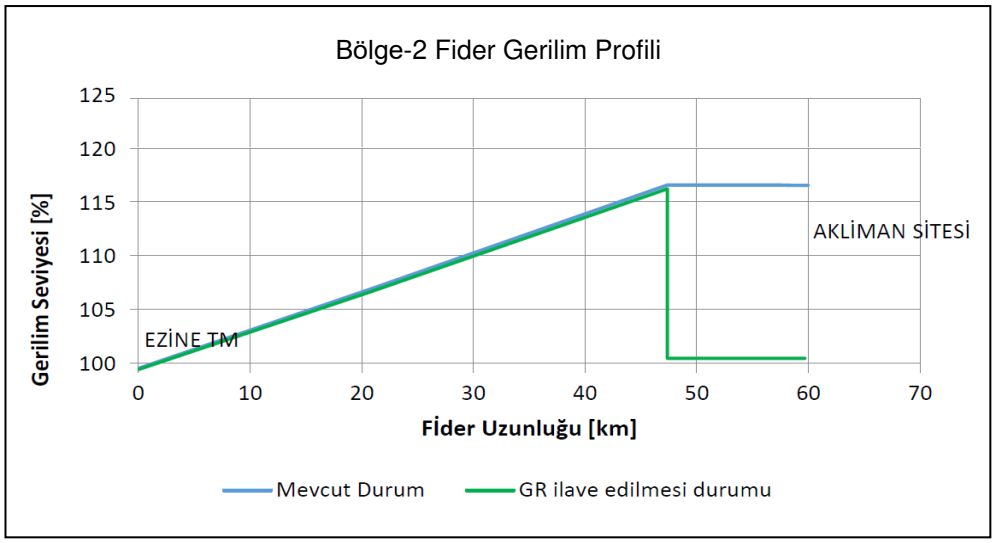
1. senaryo sonucu 2. bölgede Tuzla KÖK barasındaki gerilim seviyesi %89,21 seviyelerine kadar düştüğü görülmüştü. Bu sebeple L3 hattında Tuzla KÖK'e (26,89 km) ±%10 gerilim ayarı yapabilen 32 kademe regülatör ilave edilerek gerilim

seviyesinin %98,42'ye kadar yükseldiği görülmüştür. Analiz regülatörün 11'nci kademesinde yapılmıştır. Aynı durum için hat kayıpları ise 762 kW'tan 680 kW'a düştüğü görülmüştür. Aynı nokta için 6. senaryo durumu analiz edildiğinde ise sonuçlar Şekil 5.23'teki gibi olmuştur.




Şekil 5.23. 6. senaryo gerilim regülatörü ilavesiyle yük analizi

6. senaryoya regülatör ilavesiyle hat kayıpları 1840 kW olarak hesaplanmıştır.




Şekil 5.24. 6. senaryoda OG regülatör sonrası gerilim profili

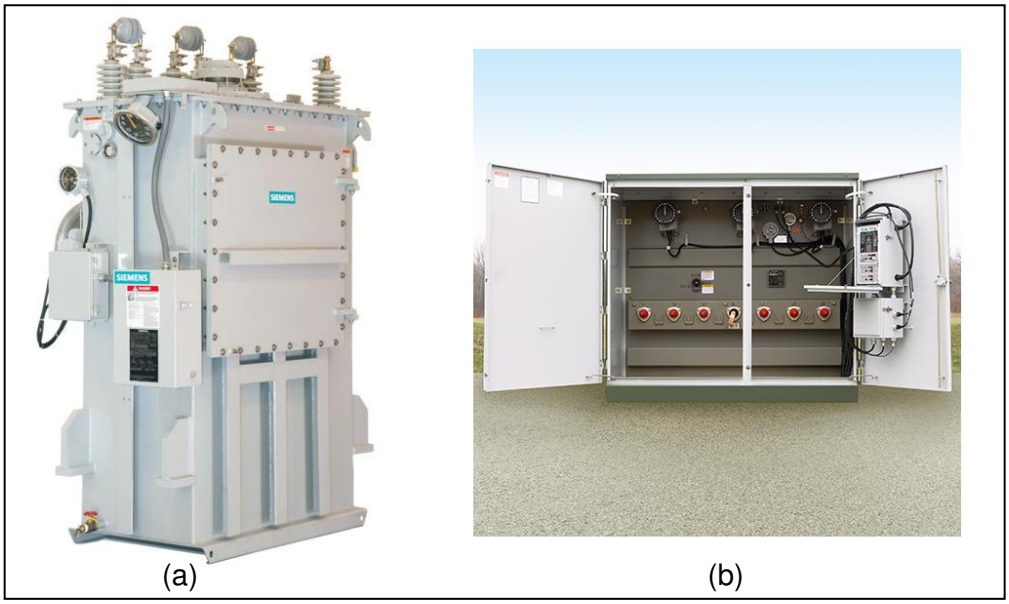
Şekil 5.24'te mesafeye bağlı gerilim değişim grafiği görülmektedir. Hat %0 yüklü ve dağıtık üretim santralleri devrede olduğu durumda hesaplanan Tuzla KÖK gerilim seviyesi %117,54 seviyelerine çıkmıştır. Aynı noktadaki gerilim regülatörünün kademesi -12'ye düşürülerek gerilim seviyesinin %100,35'lere kadar düştüğü görülmüştür. Hat kaybı ise 2358 kW'tan 1840 kW'ta düştüğü hesaplanmıştır.

Gerilim regülatöründen daha önce bulunan noktalardan beslenmekte olan diğer bölgelerde ise gerilim regülatörünün önemli bir etkisi olmamıştır. Bu 3 bölge incelendiğinde gerilim regülatörü için en uygun montaj yeri Ezine TM'den çıkan Ayvacık 2 fideri üzerindeki Tuzla KÖK olarak belirlenmiştir.

### 5.5. Regülatör Seçimi

Regülatör seçiminde özellikle maliyet açısından uygun akım değerinde ve sayıda SVR kullanmak oldukça önemlidir. Bu sebeple yapılan analizler sonucu ihtiyacı görecek SVR'nin belirlenmesi gerekir.

Dünyadaki başlıca gerilim regülatörü üreticileri ve bu üreticilerin ürünlerine ait bilgiler Tablo 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.25'te üç fazlı regülatörü modelleri görülmektedir. Biri üç fazlı diğeri ise üç adet regülatörün tek kabin içerisine koyarak oluşturduğu (Pad-Mounted) çok fazlı ürünlerdir. Diğer üreticilerin ürünleri tek fazlıdır. Fakat birçok üreticinin 3 regülatörü aynı anda kontrol edebilen tek kontrol panelleri mevcuttur. Uygun gerilim düzeyinde açık veya kapalı üçgen bağlantısına göre tek fazlı iki ya da üç gerilim regülatörü kullanılarak üç fazlı sisteme bağlantı yapılabilir [45-46].




Şekil 5.25. 3 Fazlı Regülatör Modelleri a) Siemens b) Cooper (Eaton)

Örnek olarak 34,5 kV sistemimiz için 12 MVA yük akışı olan bir fider için regülatör seçimi aşağıdaki şekilde yapabiliriz.

Maksimum hat akımını Denklem (5.4)'teki gibi;

$$I_h = \frac{12000}{\sqrt{3}x34,5} = 201 \text{ A} \quad (5.4)$$

regülatör güç hesabını ise Denklem (5.5)'teki gibi hesaplayabiliriz.

$$P_{reg} = V_f \text{ x I x \%Regülasyon} = 19,9 \text{ x } 201 \text{ x } \%10 = 400 \text{ kVA} \quad (5.5)$$

Dolayısıyla Tablo 5.5'ten, uygun değerde regülatör seçimi yapılmalıdır.

### 5.6. Regülatör Üreticileri

Dünyada OG regülatör üreten belli başlı firmalarını aşağıdaki şekilde genelleyebiliriz.

- ABB Ltd. (İsviçre)
- Belotti Variatori SRL (İtalya)
- Daihen Corporation (Japonya)
- Eaton Corporation, Cooper (ABD)
- General Electric Co. (ABD)
- Howard Industries Inc. (ABD)
- J.Schneider Elektrotechnik Gmbh (Almanya)
- Siemens AG (ABD)
- Magtech (Norveç)
- Toshiba Corporation (Brezilya) ve Yardımcı Sistemler Teknolojileri (Güney Afrika)
- Farady (Çin)

Bu üreticilerin bazılarının standart olarak ürettikleri OG gerilim regülatörlerinin akım ve gerilim değerleri Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

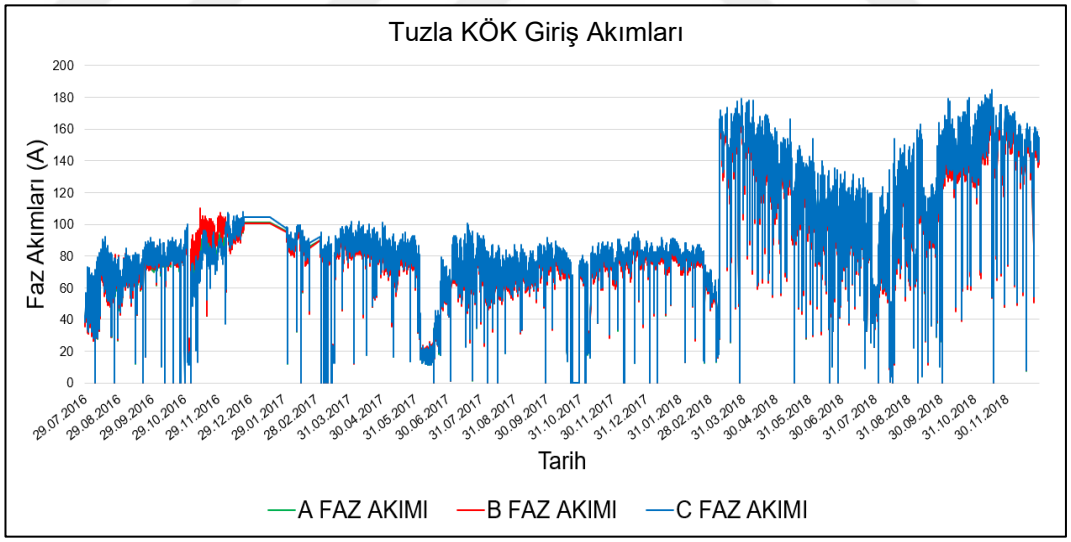
Tablo 5.5. OG regülatör üreticileri ve akım gerilim limitleri

| Üretici Firma | Üretim Yeri | Gerilim Düzeyi | Sistem | Güç (kVA) | Gerilim (V) | Hat Akımı (A) | Frekans (Hz) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| COOPER | ABD | OG | Tek Fazlı | 110 | 22000 | 50 | 50 |
| | | | | 220 | 22000 | 100 | 50 |
| | | | | 330 | 22000 | 150 | 50 |
| | | | | 440 | 22000 | 200 | 50 |
| | | | | 660 | 22000 | 300 | 50 |
| | | | | 880 | 22000 | 400 | 50 |
| | | | | 165 | 33000 | 50 | 50 |
| | | | | 330 | 33000 | 100 | 50 |
| | | | | 495 | 33000 | 150 | 50 |
| | | | | 660 | 33000 | 200 | 50 |
| SIEMENS | ABD | OG | Tek Fazlı | 100 | 22000 | 50 | 50 |
| | | | | 200 | 22000 | 100 | 50 |
| | | | | 333 | 22000 | 167 | 50 |
| | | | Üç Fazlı | 319 | 22000 | 84 | 50 |
| | | | | 638 | 22000 | 167 | 50 |
| | | | | 957 | 22000 | 251 | 50 |
| | | | | 1275 | 22000 | 335 | 50 |
| | | | | 398 | 22000 | 105 | 50 |
| | | | | 797 | 22000 | 209 | 50 |
| | | | | 1275 | 22000 | 335 | 50 |
| | | | | 1701 | 22000 | 446 | 50 |
| TOSHIBA | BREZİLYA | OG | Tek Fazlı | 200 | 19920 | 100 | 50 |
| | | | | 333 | 19920 | 167 | 50 |
| | | | | 400 | 19920 | 201 | 50 |
| | | | | 667 | 19920 | 334 | 50 |
| | | | | 883 | 19920 | 418 | 50 |
| | | | | 345 | 34500 | 100 | 50 |
| | | | | 690 | 34500 | 200 | 50 |
| GE | ABD | OG | Tek Fazlı | 220 | 22000 | 100 | 50 |
| | | | | 300 | 22000 | 150 | 50 |
| | | | | 330 | 22000 | 150 | 50 |
| | | | | 440 | 22000 | 200 | 50 |
| | | | | 550 | 22000 | 250 | 50 |
| | | | | 660 | 22000 | 300 | 50 |
| HOWARD | ABD | OG | Tek Fazlı | 100 | 19920 | 50 | 60 |
| | | | | 200 | 19920 | 100 | 60 |
| | | | | 333 | 19920 | 167 | 60 |
| | | | | 400 | 19920 | 200 | 60 |
| | | | | 667 | 19920 | 335 | 60 |
| | | | | 833 | 19920 | 418 | 60 |
| | | | | 1000 | 19920 | 502 | 60 |
| MAGTECH | NORVEÇ | AG | TN/TT | 30 | 400 | 40 | 50 |
| | | | | 70 | 400 | 100 | 50 |
| | | | | 112 | 400 | 160 | 50 |

Yaptığımız analizler sonucu gerilim regülatörünün üzerinden geçen akım değerleri aşağıdaki gibidir.

- 1. senaryo durumunda hat akımının 49 A
- 2. senaryo durumunda hat akımının 201 A
- 3. senaryo durumunda hat akımının 22 A
- 4. senaryo durumunda hat akımının 210 A
- 5. senaryo durumunda hat akımının 2 A
- 6. senaryo durumunda hat akımının 220 A
- 7. senaryo durumunda hat akımının 62 A
- 8. senaryo durumunda hat akımının 198 A

Akımlara bakıldığında regülatörden en fazla 6. senaryoda 220 A akım geçeceği analiz edilmiştir. Bu değer şebekenin tamamen yüksüz ve üretimlerin tam kapasite ile çalışması durumu için hesap edilmiştir. İlgili fiderin analizörlerden alınan Şekil 5.26'daki gerçek yüklenme ölçüm değerlerine bakıldığında en fazla 180 A'i bulduğu görülmektedir. Bu sebeple 200 A değerinde regülatör uygun görülmüştür. Pilot bölgede Toshiba markalı ±%10 aralığında regülasyon yapabilen 3 adet tek fazlı 19920 V gerilim regülatörü seçilerek montajı yapılmıştır.




Şekil 5.26. Tuzla KÖK giriş akım değerleri

### 5.7. Montaj Çalışmaları

UEDAŞ sorumluluk sahasında bulunan Çanakkale ilindeki Tuzla bölgesinde takılması planlanan regülatörler için en uygun yer Tuzla KÖK olarak öngörülmüştür. Montaj planları Ek-A da bulunan KÖK binası içerisine konularak giriş hattına bağlanmıştır. Girişinde ve çıkışında ayırıcı bulunan regülatörün aynı zamanda

baypas ayırıcısı da bulunmaktadır. Böylelikle servis dışı durumlar için enerji sürekliliği sağlanmaktadır.

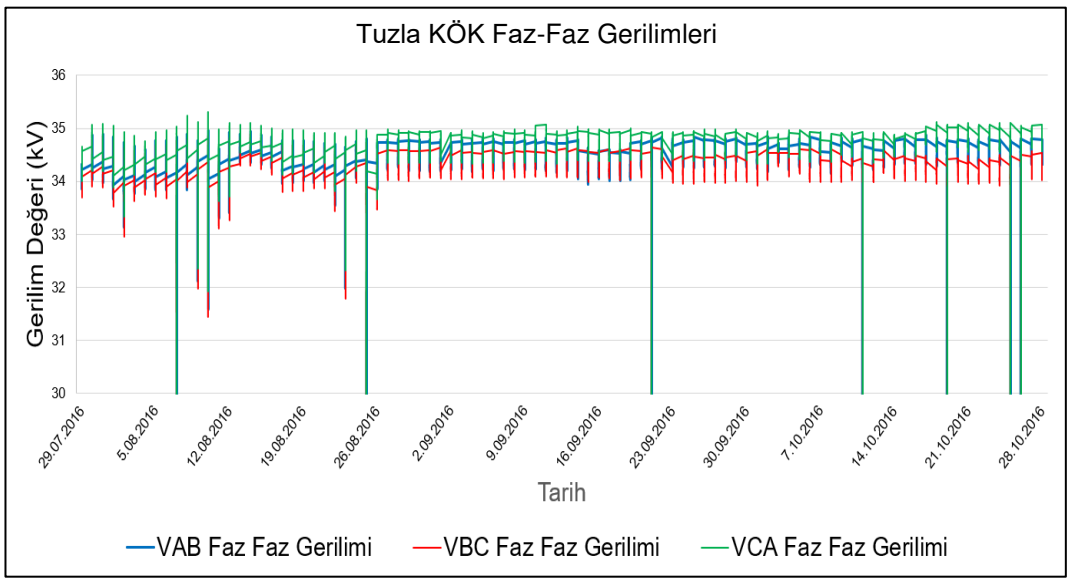
Üç adet Toshiba markalı OG gerilim regülatörü şekilde görüldüğü gibi tel fens içerisine gerekli emniyet ve yaklaşma mesafeleri gözetilerek yerleştirilmiştir. Kumanda panoları her bir regülatörün üzerinde olup manuel kumandanın yanı sıra uzaktan izleme ve kontrol için SCADA sistemine entegre edilmiştir.

### 5.8. Sağladığı Faydalar Gerilim Profiline ve Şebeke Kayıplarına Etkisi

Gerilim regülatörünün etkisinin incelenmesi amacıyla, Ayvacık 2 fideri üzerindeki farklı bölgelerde bulunan kalite kaydedicilerden gerilim ölçümleri alınmıştır. Gerilim regülatörü tesisinin sonrasında meydana gelen gerilim profili değişimine göre değerlendirmeler yapılmıştır.

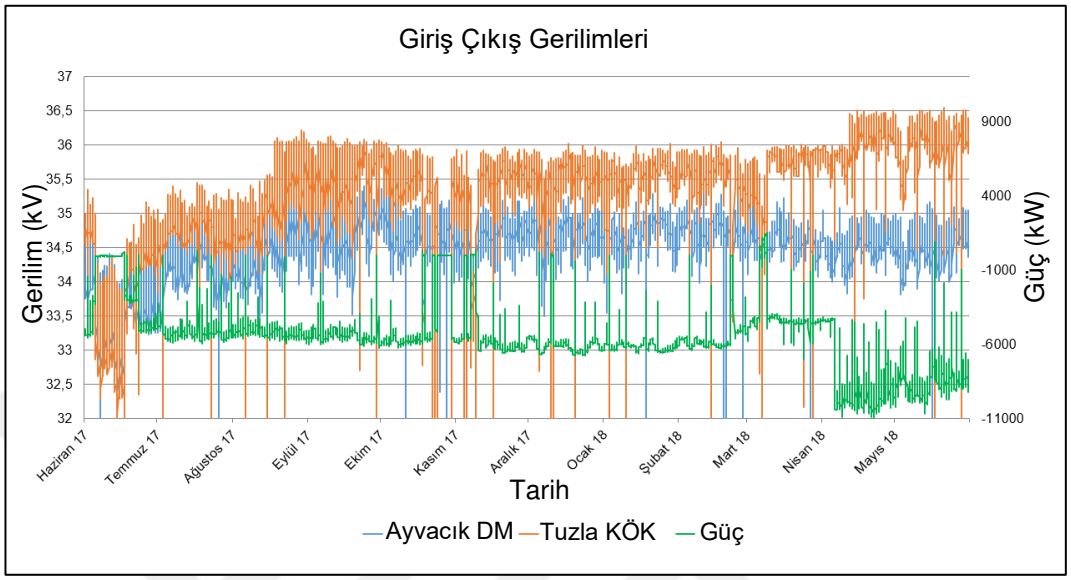
UEDAŞ bölgesinde, gerilim regülatörü uygulamasının amacı dağıtık üretimlerden kaynaklı gerilim yükselmesinin önlenmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaçta Tuzla ve MTN jeotermal enerji (JES) elektrik üretim santralinin bağlı olduğu Tuzla Kök'ün giriş noktasına gerilim regülatörü tesis edilmiştir.

Şekil 5.27'de Tuzla Kök'te yapılan ölçümlerde montaj öncesi ve montaj sonrası gerilim profili bulunmaktadır. 2016 yılının ağustos ayı montajı yapılan SVR öncesi gerilimdeki dalgalanma net bir şekilde gözlemlenirken montaj sonrası SVR'nin adım gerilimi oranında 34,5 kV dolaylarında gerilimin sabit kaldığı gözlemlenmiştir.




Şekil 5.27. Tuzla KÖK faz-faz gerilim değerleri

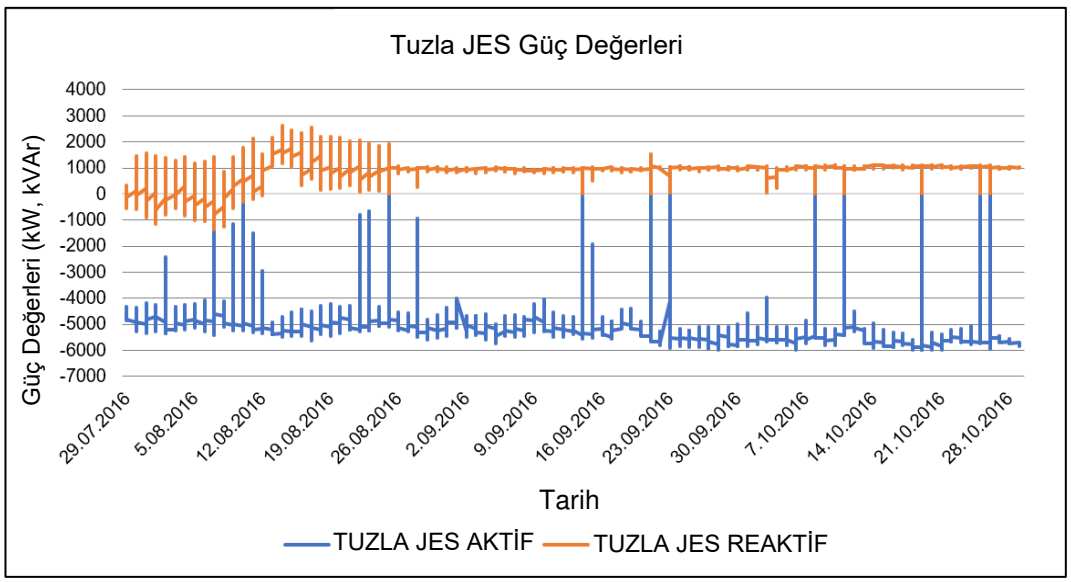
Şekil 5.28'deki grafikte ise Tuzla JES ve MTM JES santrallerinin etkisiyle güç akış yönüne bağlı olarak gerilimdeki değişim ile SVR'nin yaptığı regülasyon görülmektedir.




Şekil 5.28. Ayvacık DM Tuzla KÖK güce göre gerilim farkı

Grafikte Tuzla KÖK'de üretimin artışına bağlı olarak gerilimde yükselme olduğu görülmektedir. Üretim kaynaklı güç 11 MW'ı bulduğunda Tuzla KÖK barasındaki gerilim 36,5 kV'u bulmaktadır.

Fakat gerilim regülatörü sonrasındaki Ayvacık DM'de gerilim sabit tutularak 34,5 kV seviyelerinde dolaştığı ve regülasyon yaptığı görülmektedir.



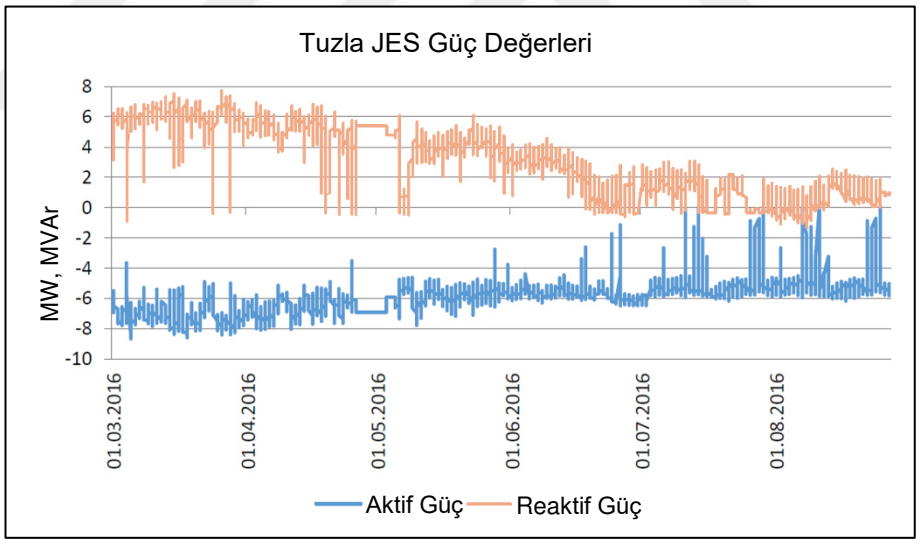

Şekil 5.29. Tuzla JES reaktif güç profili

Aynı durum için Ayvacık fiderinin reaktif güç değerlerine baktığımızda Şekil 5.29'daki sonuçlar görülmüştür. Burada regülatör öncesinde aktif güce bağlı olarak reaktif güçte de artış olduğu fakat regülatör montajı sonrasında reaktif gücün kararlı bir halde sabit kaldığı görülmüştür.

Bu değişimin sebebi santrallerin sabit güç-cosφ modunda çalıştığında, gerilimi sabit tutabilmek için şebekeden reaktif güç çekmesi gerektiğindendir. Bu da hat kayıplarına etki etmektedir.

Gerilim regülatörünün devreye girmesi ile Tuzla Kök ve jeotermal enerji santrali baraları ideal gerilim seviyesinde tutulabilmektedir. Bu sebeple santrallerin kendi başlarına gerilimi kontrol etmelerine gerek kalmamıştır. Bu etkileşim Şekil 5.29'de gösterilen son 2 aylık ölçümlerde görülebilmektedir.

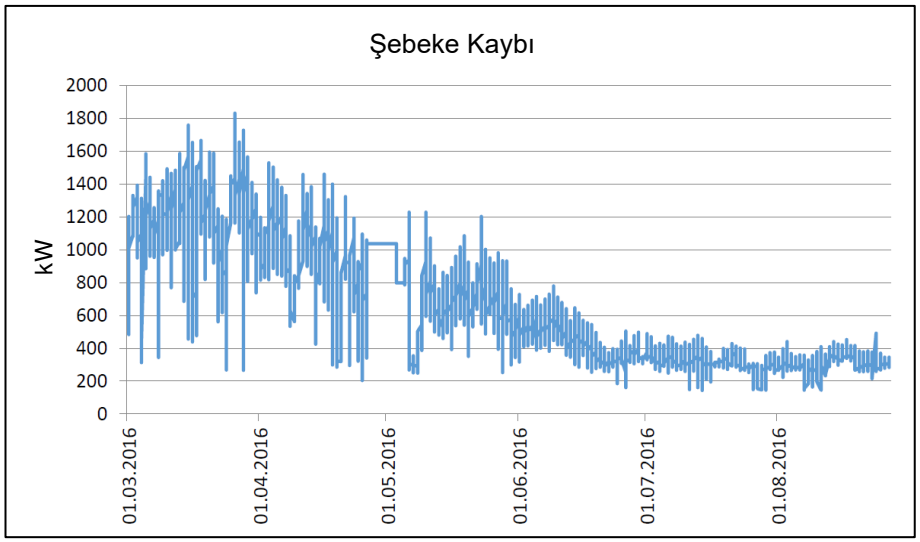
Gerilim regülatörünün devre alınma tarihi olan 25.08.2016'dan itibaren santralin reaktif güç üretimi düşmüş ve sabitlenmiştir. Bu durumda santralin güç faktörü 0,92 mertebelerine çıkabilmiştir.




Şekil 5.30. Tuzla JES regülatör öncesi güç profili

Güç faktöründeki bu düzelme, şebekeden çekilen reaktif gücü, dolayısıyla hat akımını azaltmıştır. Bunu Şekil 5.30'daki regülatör montajı öncesindeki reaktif güç akışına bakarak analiz edebiliriz.

Buradan elde ettiğimiz reaktif güç akışına göre oluşacak şebeke kayıpları Şekil 5.31'deki gibi olacaktır.

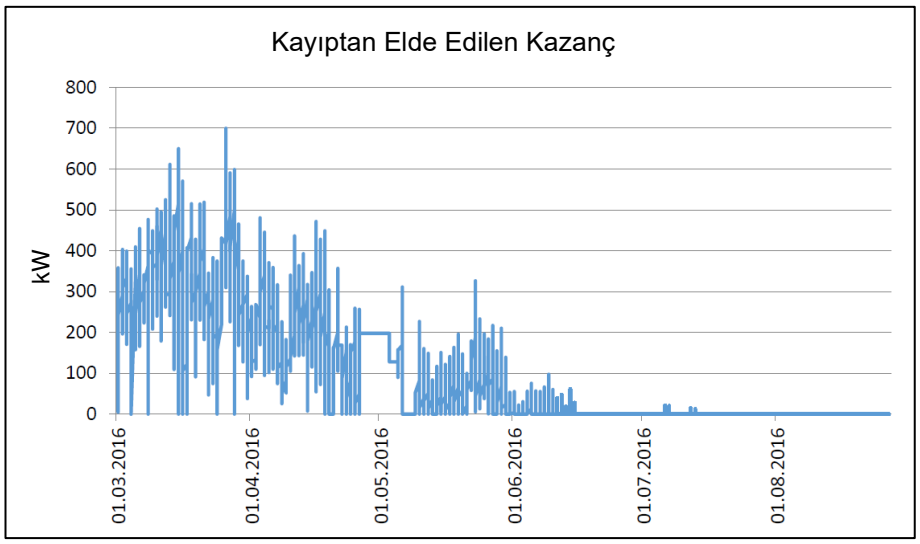



Şekil 5.31. Şebeke kaybı simülasyon sonuçları

Görülebileceği gibi fider yükünün az olarak bilindiği ilkbahar döneminde şebeke kaybı 1800 kW'lara kadar çıkmıştır. Ayrıca MTN JES'in devreye girmesi ile şebeke kaybının daha da artacağı bilinmektedir.

### 5.9. Ekonomik Değerlendirme

İlgili dönemde 2 aylık Tuzla KÖK barası ölçümlerine uygun olarak şebeke modeli üzerinde gerilim regülatörü öncesi ve sonrası durumları için gerçekleştirilen kayıp analizlerinin enerji bazında değerlendirilmesi yapılmıştır. Buna göre Şekil 5.32'deki kazanç grafiği elde edilmiştir.




Şekil 5.32. Şebeke kayıplarına göre kayıptan elde edilen kazanç

6 ay sonunda toplam 394.586 kWh fayda sağlayacak olan gerilim regülatörü yatırımı için amortisman süresi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

Elde edilen kazanç ve kayıpların Denklem (5.6) haline getirirsek;

$$\frac{MxK^n}{\sum_{y=1}^{n} T_y} = 1 \text{ olmalıdır.} \qquad (5.6)$$

Burada n Geri dönüş süresi (yıl); M Gerilim regülatörü maliyeti 430.000 TL[1]; K Yıllık Faiz Oranı=%10; $T_y$ Teknik kayıptan elde edilen yıllık kazanç olarak gösterilebilir.

$T_y$ =Yıllık Enerji kazancı x Enerji maliyeti (0,33TL/kWh kabul edilmiştir.) (Yıllık Enerji kazancı 6 aylık veriden örneklenmiştir).

n=2 yıl için;

$$\frac{430.000x1.1^2}{2x394.586x0,33x2} = \frac{520.300}{520.853} \approx 1 \text{ olacaktır.}$$

Buradan çıkan sonuca göre Ayvacık 2 fideri için regülatör uygulamasının amortisman süresi yaklaşık 2 yıl olacaktır.

[1] 2018 Temmuz dolar döviz kuru ile yaklaşık regülatör maliyeti.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada öncelikle elektrik dağıtım şirketlerinin uymakla yükümlü olduğu hizmet kalitesi yönetmeliğinde belirtilen teknik kalitenin tanıtımı yapılmıştır. Sonrasında teknik kalite parametrelerinden önemli bir problem olan gerilim düşümü ve uygulanan çözüm yöntemleri hakkında araştırma yapıp bunlardan otomatik gerilim regülatörü hakkında geniş bir bilgi verilmiştir. Son olarak ta UEDAŞ sorumluluk bölgesindeki Çanakkale'de hayata geçirilen gerilim regülatörü projesinin sonuçları ortaya konmuştur.

Projede Ezine TM'den çıkan Ayvacık 2 fideri üzerinde yapılan analizler sonucu uygun nokta tespiti yapılarak, bu nokta üzerindeki gerekli ölçümler değerlendirilmiştir.

Burada ilk önce Ayvacık 2 fideri üzerindeki üç bölge değerlendirilmiş ve bunlardan dağıtık üretim tesislerinin bulunduğu Tuzla KÖK bölgesinin regülatör montajı için uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu bölgede yapılan analizlerde sekiz farklı senaryo çalışılarak şebeke yapısındaki gerilim değişimleri hesaplanmıştır.

Bu sekiz senaryo, şebekenin boşta, yarı yükte, tam yükte ve aşırı yükte olacak şekilde yüklendiği durumlar için dağıtık üretim santrallerinin devrede olması ve devreden çıkması durumlarında şebekeye olan etkilerinin incelenmesi amacıyla oluşturulmuştur.

Elde edilen sonuçlarda dağıtık üretim santralleri devrede değilken şebeke yüklendiğinde %89'lara varan mutlak gerilim düşümü; üretim santralleri devreye alındığında ise yükün %50'den aşağıya düşmesi ile %113'e yükselen aşırı gerilimlerin oluştuğudur. Bu iki değer aralığı sınırların dışındadır. Bununla birlikte bu değişimler teknik kalite sınırları içerisinde bile olsa, yüke bağlı olarak sürekli %90 ile %110 arasındaki gerilim değişimi bölgedeki tüketiciler için oldukça rahatsız edici bir durumdur.

Bunlara ilaveten dağıtık üretim santralleri devredeyken Ayvacık 2 fiderinin beslediği bölgede olarak ortalama 1600 kW dolayında hat kaybı mevcuttur. Genellikle sabit

güç-cosΦ modunda çalışan üretim santralleri için gerilimi dengelemek hat akımının reaktif bileşenini de azaltacağından hat kayıplarına önemli katkısı olmaktadır.

Yapılan çalışmada ve fider üzerindeki farklı noktalardan alınan ölçüm verileri incelendiğinde, fider analizleri esnasında gerçekleştirilen farklı şebeke modelleriyle benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Her ne kadar şebekede bulunan yüklerin sayısal şebeke modeli ile birebir denk olması mümkün olmasa da gerilim regülasyonun simülasyon sonuçları ile yakın seviyelerde olduğu ve analizlerin tutarlılığı görülmüştür.

Bu ölçümler sonucunda, gerilim regülatörün bağlandığı Tuzla Kök barasında her iki yük akışı durumunda da %100$V_n$'de tuttuğu ve gerilim salınımlarını engellediği görülmüştür. Bu kapsamda UEDAŞ bölgesi özelinde hedeflenen en önemli fayda, dağıtık üretim santrallerinden kaynaklı gerilim yükselmelerinin engellenmesiydi. Ölçüm sonuçlarına göre bu hedefe ulaşıldığı görülmüştür.

İlaveten, mevcut üretim tesislerinin çalışma karakteristiği iyileştirilmiştir. Gerilim regülatörünün tesisinden önce, üretim tesisleri ideal gerilim seviyesini sağlayabilmek amacıyla düşük güç faktöründe çalışmaktaydılar. Bu durum, santrallerin şebekeye aktif güç vermelerinin yanında, şebekeden yüksek miktarlarda reaktif güç çekmelerine neden olmaktaydı.

Üretim santrallerinin gerilimi dengelemek için aşırı reaktif güç talebi, dağıtım sistemindeki teknik kayıpları arttırmakta ve dolayısıyla maddi kayıp oluşturmaktadır. Gerilim regülatörünün tesis edilmesi ile birlikte, regülatör sonrasında bulunan Tuzla JES ölçümlerinde reaktif güç talebinin sabitlendiği ve 0,92 güç faktörü seviyelerine çıktığı görülmüştür.

Bu değişim fider üzerinde teknik kayıpları azaltarak maddi kazanç sağlamaktadır. 6 aylık ölçüm verileri baz alınarak yapılan değerlendirme de 2 yıl sonunda sağlayacağı kazanç ile yatırımın amortismanını tamamlaması beklenmektedir.

Şebeke işletmecileri yaygınlaşan üretim santrali potansiyelini ve gerilim düşümü probleminin olduğu noktaları gayet iyi bilmektedir. Buralar için regülatör seçiminde öncelikle problem yaşanılan bölgede iyi bir analiz yapılmalı ve bu doğrultuda uygun regülatör seçimi ile en ekonomik problem çözümü yoluna gidilmelidir.

Mevcut durumda ilgili bu problemi çözmek için, hatta kapasite artışı veya yeni bir hat yatırımı yapılmaktadır. İlaveten yeni santrallere enerji müsaadesi verebilmek için yeni trafo merkezlerinin yapılması beklenmektedir.

Sistemlerde artan güç talebi gerilim regülatörü pazarının büyümesine neden olacaktır. Yine bu talebi karşılamak için dünyada gelişmekte olan ülkelerde olduğu gibi enerji şebekelerini yenileme ve akıllı şebeke altyapısına yatırım yapılması zorunlu ihtiyaç haline gelmektedir. Bu tür yatırımlar sayesinde kesintisiz enerji arzı ve gerilim dalgalanmalarının önlenmesi en büyük hedef noktasıdır.

Genel olarak otomatik gerilim regülatörleri dünya çapında kullanımı yaygın olsa da henüz ülkemizde kullanılmayan bir ürün olarak gelecekte sisteme girmesinin önemli katkıları olacaktır. Ülke içinde kullanma ihtiyacı ile birlikte yerli üreticilerin de bu ürünler için gerekli yatırımları yapması ve yaygınlaşmasına katkı sağlayacakları düşünülmektedir.

Şu anda kullanımının sınırlı olmasında en önemli etken, şebeke işletmecilerinin yeterli farkındalığının bulunmaması ve yerli üreticilerin olmaması ile ürünlerin yurtdışından tedarik ediliyor olması sebebiyle yapılacak olan ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Yaygınlaşacak kullanım ile daha farklı şebeke yapısında kullanılması ve dolayısıyla yapılacak analizler sonucu fayda maliyetinin de daha ekonomik olacağı değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR


[1] Yaşar C., Aslan Y., Biçer T., Bir Dağıtım Transformatörü Bölgesindeki Kayıpların İncelenmesi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2010, (22), 9-22.

[2] Türkiye Elektrik İletim AŞ, TEİAŞ, Kuruluş-Tarihçe, https://www.teias.gov.tr/tr/hakkimizda/tarihce (Ziyaret tarihi: 17 Haziran 2019).

[3] Düzgün B., Türkiye Elektrik İletim ve Dağıtım Şebekesinin Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesi ve 2023 Projeksiyonları, *Politeknik Dergisi*, 2018, **21**(3), 621-632.

[4] Alexio L., Solvang T., Capacity of Distribution Feeders for Hosting Der, *International Council on Large Electric Systems (CIGRE)*, Working Group C6.24, Haziran 2014.

[5] Peat W., Mason A., Flexible Networks for a Low Carbon Future, *SP Energy Networks*, Methodology&Learning Report, Work package 2.4, 3, 2015.

[6] EPDK, Elektrik Piyasası Sektör Raporu, *T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu*, 10, 2018.

[7] Watanabe R., Imanishi Y, Hida Y, Optimal Allocation and Planning of SVR on Distribution Network under Demand Growth, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality* (*ICREPQ13)*, Bilboa, Spain, 20-22 Mart 2013.

[8] Welch, L. E., Taking Control of Voltage Drop and Reactive Power, *Primedia Business Magazines & Media Inc*., 2004.

[9] Lazimah J., Hamduni M., Reinforcement and Upgrade of Dar Es Salaam, Klimanjaro and Arusha Transmission and Distribution System Project, Final Report, *TANESCO*, **4**(3), 2005.

[10] Elektrik Şebeke Yönetmeliği, EPDK, *T.C. Resmî Gazete*, Ankara, 28 Mayıs 2014, 29013.

[11] TS EN 50160, Genel Elektrik Şebekeleri Tarafından Sağlanan Elektriğin Gerilim Karakteristikleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2011.

[12] Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği, EPDK, *T.C. Resmî Gazete*, Ankara, 21 Aralık 2012, 28504.

[13] Olatoke A., Investigations of Power Quality Problems in Modern Buildings, Brunel University, School of Engineering and Design, London, 2011.

[14] Kılıç L., Arsoy A. B., Orta Gerilim Şebeke Olaylarının Tüketici Noktasında Karşılaştırmalı İncelenmesi, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Sakarya, Türkiye, 4-6 Haziran 2015.

[15] Lakervi E., Holmes E. J., *Electricity Distribution Network Design*, 2nd Edition, Lightning Source UK Ltd, Milton Keynes, 2003.

[16] Civanlar S., Graigner J. J, Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part 3: The Numerical Results, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems on PAS, *Grainger, Department of Electrical and Computer Engineering North Carolina State University*, **104**(11), 3291-3297, 1985.

[17] Instruction Manual for Single Phase Voltage Regulators, *Toshiba America Do Sul LTDA*, Bulletin EE-40023, 4 Nisan 2015.

[18] Grigsby L. L., Electric Power Generation, Transmission, and Distribution, *The Electric Power Engineering Handbook*, Third Edition, CRC Press, New York, 26-22, 2012.

[19] Pereira C. A. N., Castro C. A., Optimal Placement of Voltage Regulators in Distribution Systems, *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, Romania, 28 Haziran-2 Temmuz 2009.

[20] Attia H. A., Optimal Voltage Profile Control and Losses Minimization of Radial Distribution Feeders, *Electrical Power and Machines Department*, Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt, 2008.

[21] Romeo D. S., Voltage Regulation in Distribution Systems- Tap Changer and Wind Power, Lund University, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation Faculty of Engineering, Lund, 2010

[22] Csanyi E., Voltage Regulators Used to Control the Voltage at the End of a Distrbution Feeder, Electrical Engineering Portal, https://electrical-engineering-portal.com/voltage-regulators, (Ziyaret Tarihi: 4 Ekim 2019).

[23] Wareham D., Step Voltage Regulators, *Cooper Power System by Eaton*, 11, 2013.

[24] Distribution Voltage Regulators Brochure, *Siemens AG Energy Sector*, Erlangen, Germany, 2011.

[25] Villiers de E., Merwe de L. V. Voltage Regulation, *ESCON,* EIT Evaluation Presentation, 24, Haziran 2014

[26] Safigianni A. S., Salis G. J., Optimum Voltage Regulator Placement in a Radial Power Distribution Network, *IEEE Transactions on Power Systems*, **15**(2), 879-886, May 2000.

[27] Almeida A. M. F., Souza B. A., Pamplona F. M. P., Braz H. D. M., Optimal Localization of Voltage Regulator Banks in Distribution Systems Based on Technical and Economic Criteria, Federal University of Campina Grande, *18th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2005),* Turin, Italy, 6-9 Haziran 2005.

[28] Şen M., Balcı E. M., Gerilim Dengesizliğinin Ölçülmesi İçin Yeni Bir Yaklaşım, *EMO V. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, 45-48, (2013)

[29] Moran C. G., Arboleya P., Mojumdar M. R. R., Editors: Terzija V., 4-Node Test Feeder with Step Voltage Regulators, *Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier B.V., Spain, **94**, 245-255, 2018.

[30] Carlen M., Jakobs R., Slupinski A., Line Voltage Regulator For Voltage Adjustment in Mv-Grids, *23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2015)*, Lyon, France, 15-18 Haziran 2015.

[31] Bhattacharyya S., Cobben S., Myrzik M. A., Kling W. L., Consequences of Poor Power Quality – An Overview, *42nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2007)*, Brighton, UK, 4-6 September 2007.

[32] TS EN 61000-4-30, Elektromanyetik uyumluluk (emu)- Bölüm 4-30: Deney ve ölçme teknikleri- Güç kalitesi ölçme metotları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2017.

[33] Cooper Power Systems, Single-Phase Step Voltage Regulators, *EATON*, Voltage Regulators, Bulletin CA225001EN, 2015.

[34] Vidya M., Pramila P., Power Quality Issues in Industries and Distribution Systems, *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 2016, **3**(6), 75-78.

[35] Reddy S. V. B., Rao G. S., Nagaraju D., Optimal Voltage Regulator Placement In Radial Distribution Systems Using Fuzzy Logic, *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, 2013, **2**(9), 26-34.

[36] Filho P. M. C., Medeiros M. F., Localization of Voltage Regulators in Distribution Systems by a Mixed Genetic –Tabu Search Algorithm, *Energy and Power Engineering*, 2013 **5**(4), 751-755.

[37] Murphy C., Keane A., Optimised Voltage Control for Distributed Generation, Electricity Research Centre, *University College Dublin*, Dublin, Ireland, 2015.

[38] Mandi R. P., Yaragatti U. R., Power Quality Issues in Electrical Distribution System and Industries, *National Conference on Recent Advances in Control Strategies for Integration of Distributed Generation Sources to Grid and Control of Their Power Quality Issues*, REVA University, Bangalore, India, 64-69, 22-23 July 2016.

[39] Colopy C. A., Grimes S., Foster J. D., Proper Operation of Step Voltage Regulators in the Presence of Embedded Generation, *Cooper Power Systems*, Wisconsin, USA, 1999.

[40] Siemens JFR Distribution Step Voltage Regulator User Instruction Manual, *Siemens Energy In.*, Bulletin 21-115532-001, October 08.

[41] Kersting W. H., *Distribution System Modeling and Analysis*, Third Edition, CRC Press, New Mexico, 2012.

[42] Davis M. W., Broadwater R., Hambrick J., Modeling and Testing of Unbalanced Loading and Voltage Regulation Final Report, *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/SR-581-41805, 30-31, July 2007.

[43] GE Shreveport Voltage Regulators, *Voltage Regulator Commercial Splash*, Bulletin 4Q 2011, 27 October 2011.

[44] Miller S. E., P.E., Inc, Cooper Voltage Regulators, Oakdale Substation Pictures, http://www.sempeinc.com/projects/oaksub/oaksub_pictures_2.html, (Ziyaret Tarihi: 08 Ekim 2019).

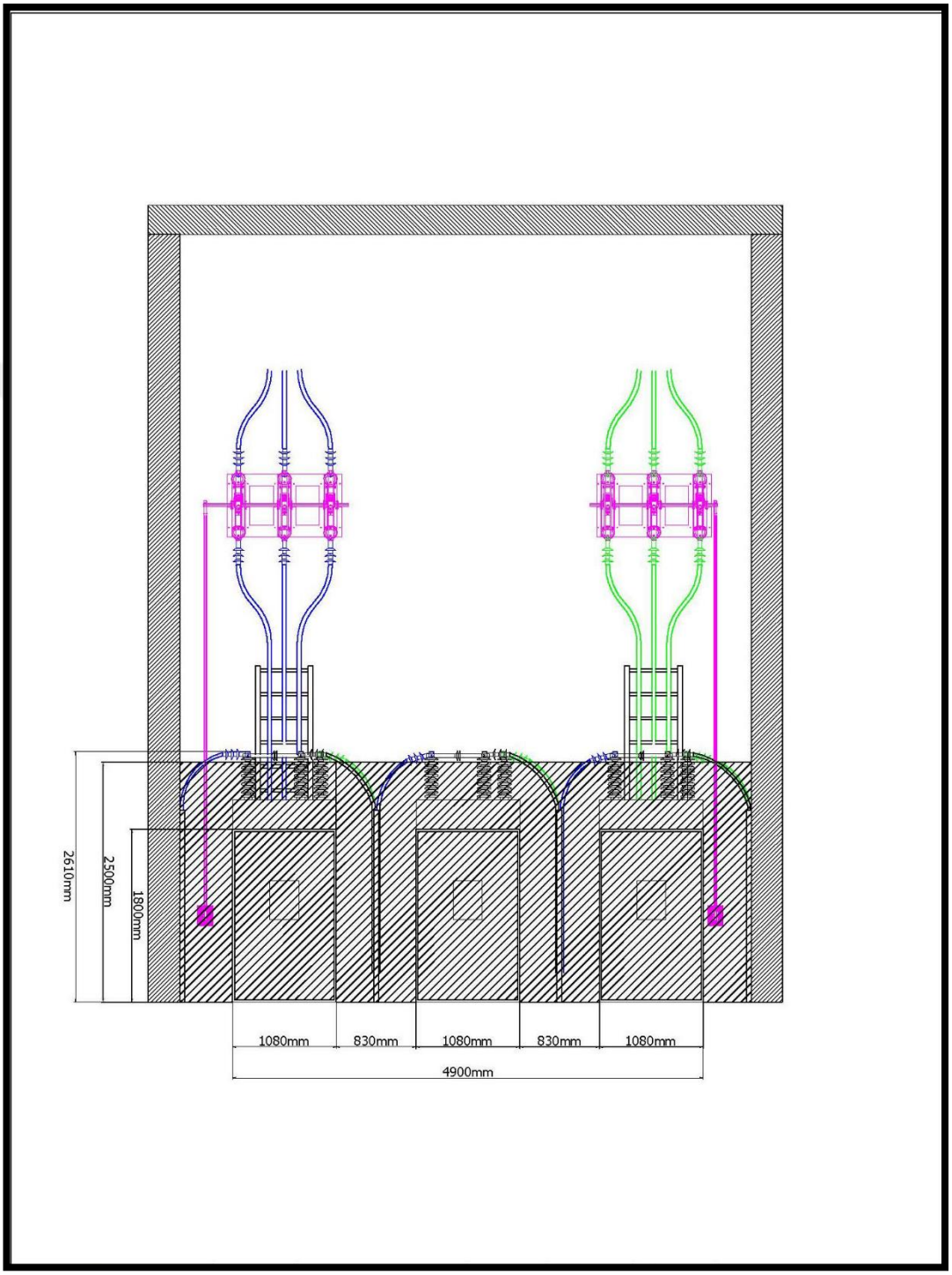
[45] Siemens, SFR Medium-voltage Voltage Regulators, https://new.siemens.com/us/en/products/energy/medium-voltage/medium-voltage-outdoor-distribution/sfr-voltage-regulators.html, (Ziyaret Tarihi: 08 Ekim 2019).

[46] Cooper Power Series, Multi-phase Pad-mounted Step Voltage Regulator, Eaton Powering Buisiness Worlwide, Voltage Regulators Catalog Data, Bulletin CA225004EN, August 2018.

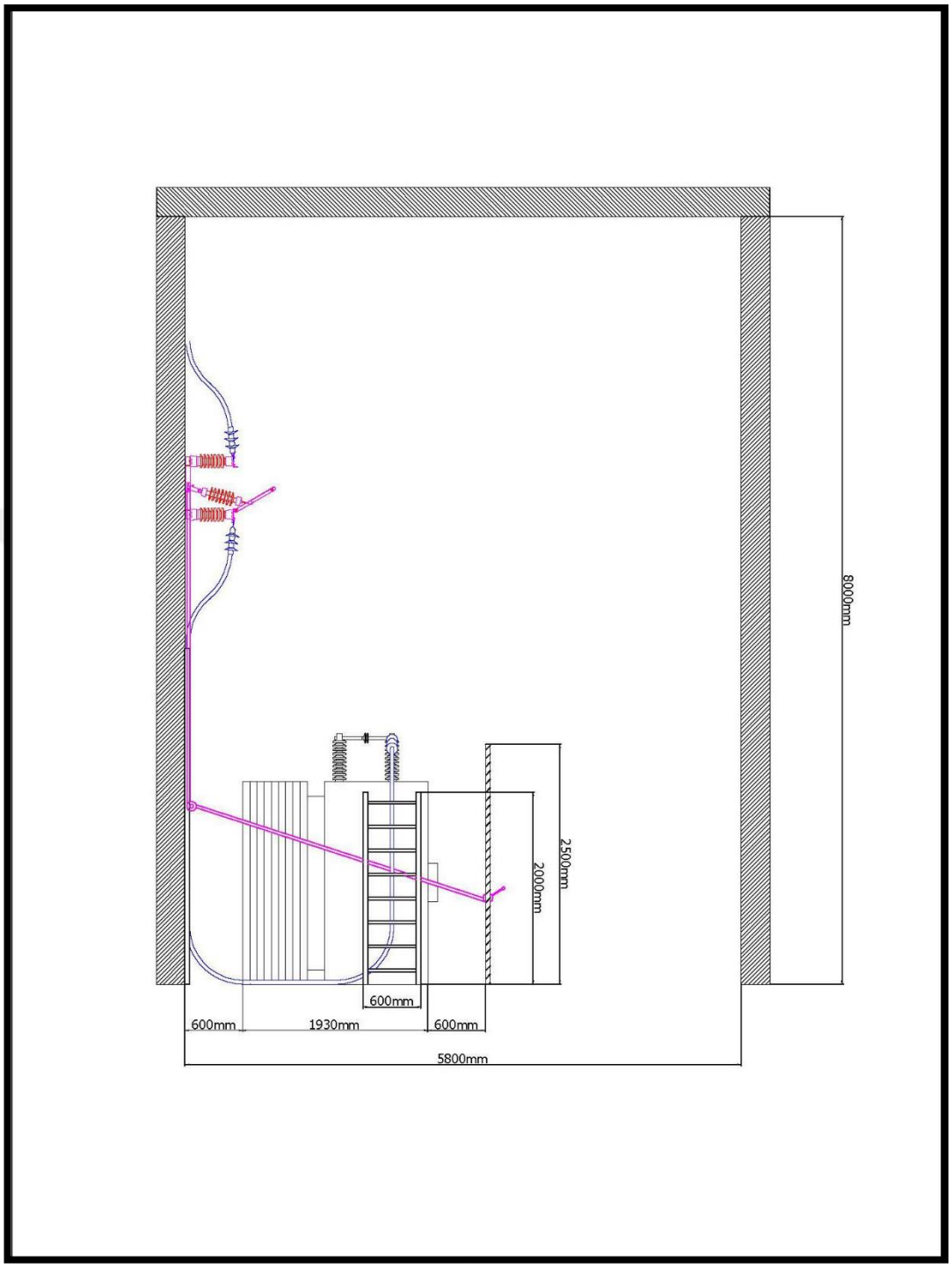
# EKLER

**Ek-A**

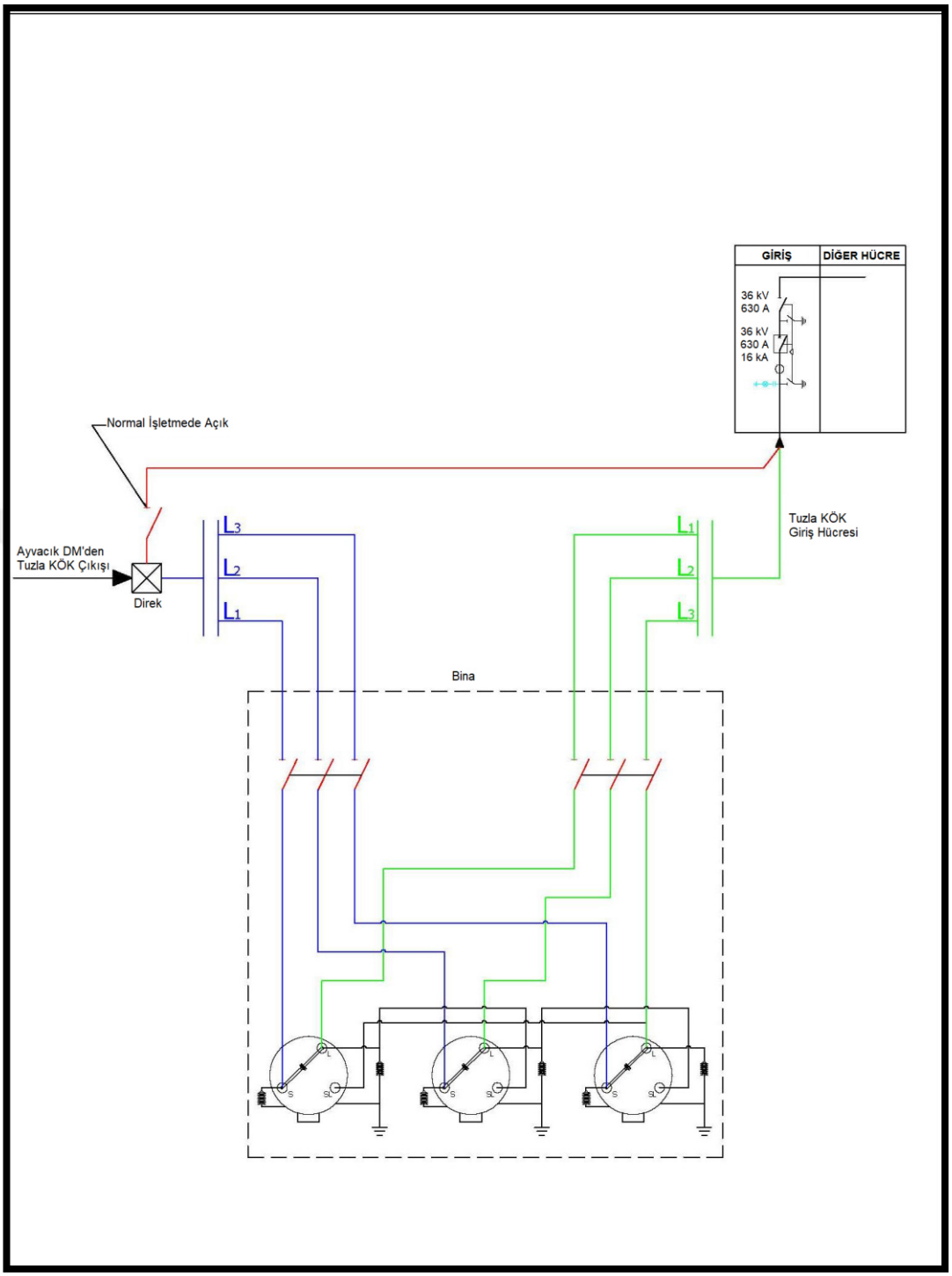
Bölüm 5.7'de anlatılan montaj çalışma planları aşağıda gösterilmektedir.



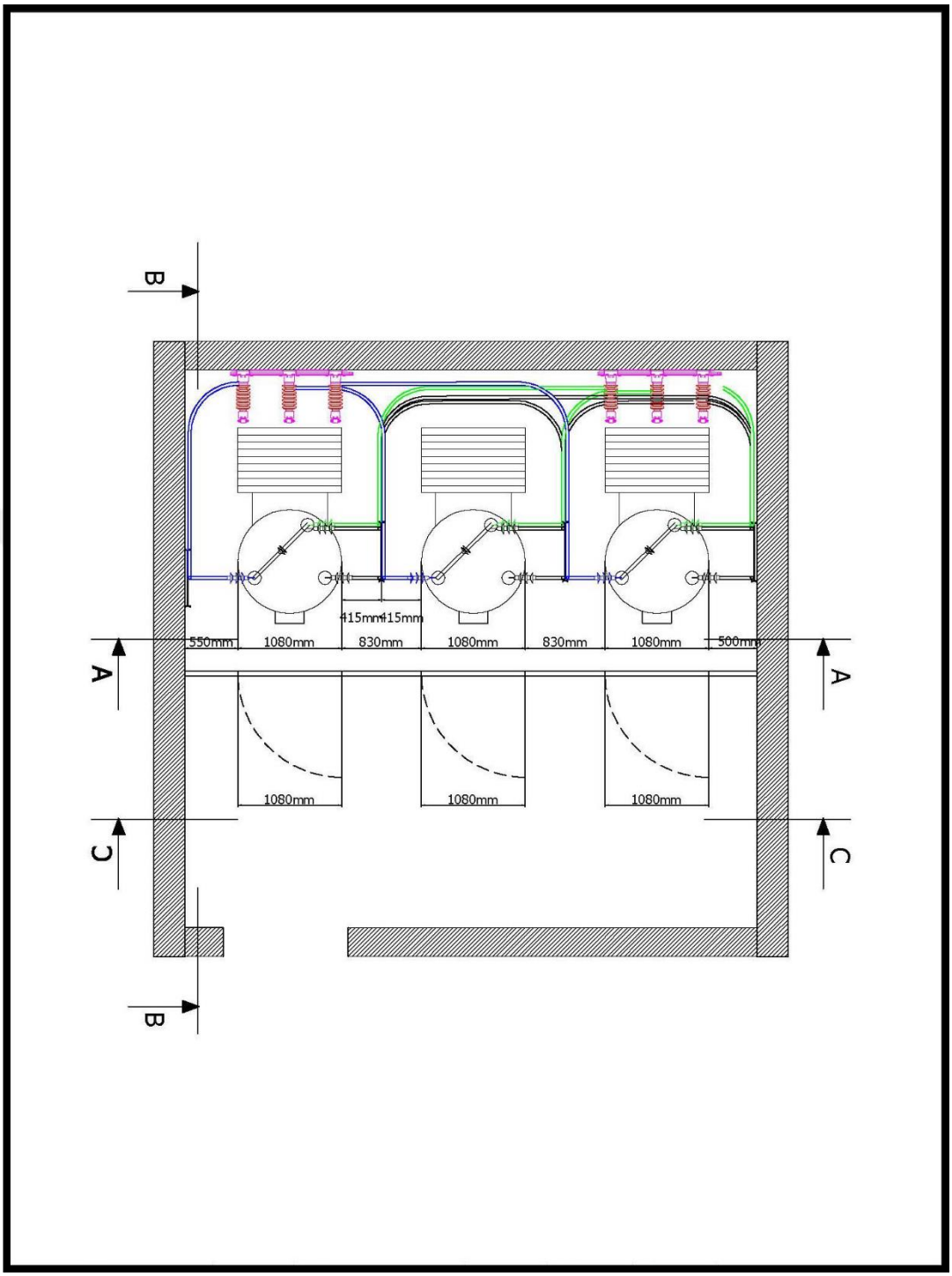

Şekil A.1. A-A Kesiti montaj planı



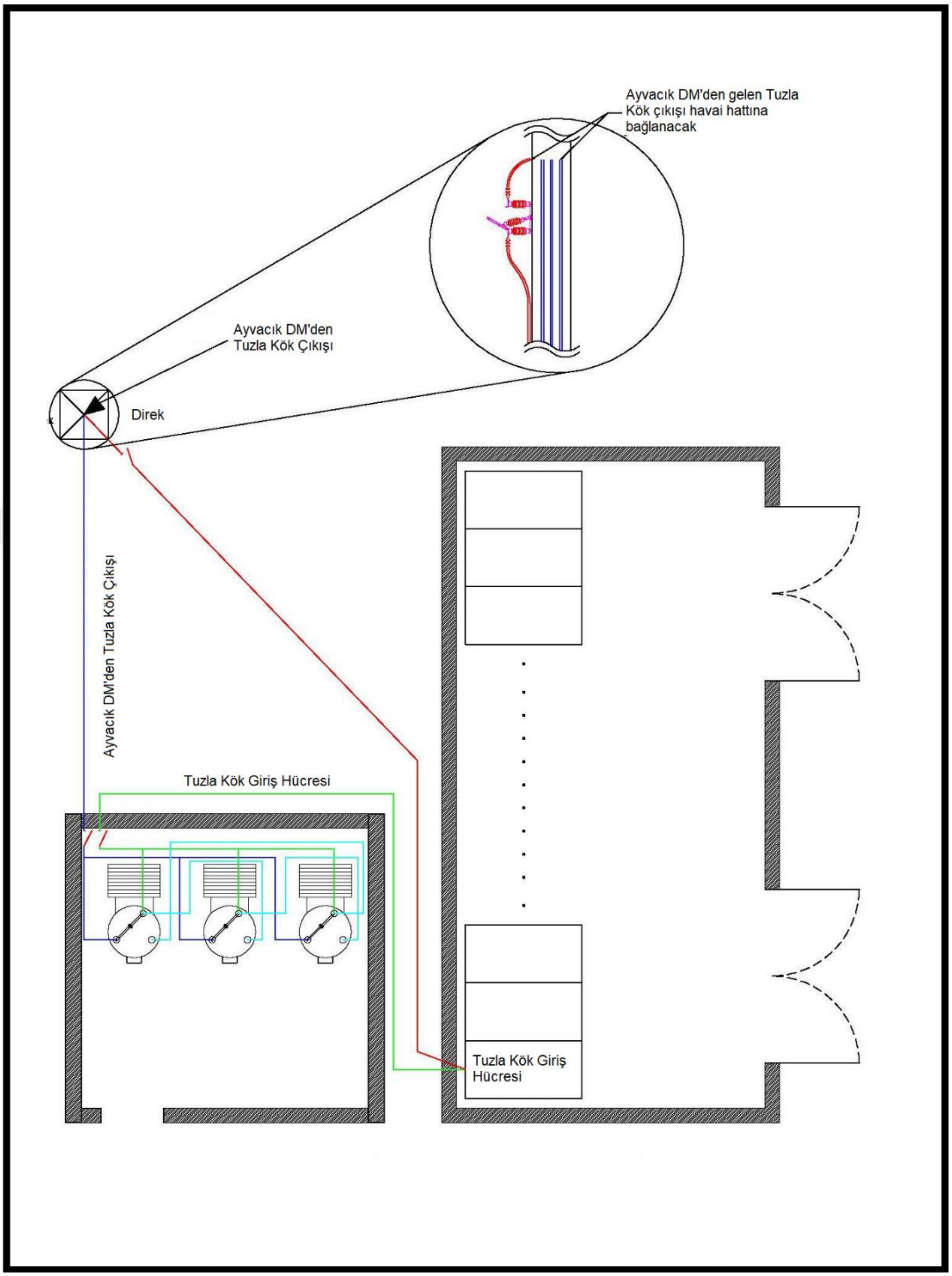

Şekil A.2. B-B Kesiti montaj planı




Şekil A.3. Tek hat şeması




Şekil A.4. Üst görünüş




Şekil A.5. Yerleşim planı




Şekil A.6. Montaj resmi

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Alboyacı B., **Kızılkaya C.,** Dağıtım Sisteminde OG Regülatör Kullanımı, Bileşim Yayıncılık, Fuarcılık ve Tanıtım Hizmetleri San. Tic. A.Ş.- *3e Electrotech Dergisi*, (297), 12-19, Temmuz 2019.

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Kocaeli'de doğdu. Lise öğrenimini Gölcük Teknik Lisesi'nde tamamladıktan sonra 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektrik Bölümü'nde ön lisans yaptı. 2003 yılında dikey geçiş yaparak girdiği İnönü Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2006 yılında mezun oldu. On seneye yakın özel sektörde çeşitli görevlerde bulundu. Akabinde 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Halen özel sektörde Ar-Ge departmanında bölüm yöneticisi olarak görevini sürdürmektedir.