



A2.03 ÇALIŞMA GRUBU TEKNİK RAPOR

FAZ KAYDIRICI TRANSFORMATÖRLERİN ÜLKEMİZDEKİ GEREKSİNİMİNİN VE ŞARTNAMASEL İLKELERİN BELİRLENMESİ

Başkan: Erdi DOĞAN,

Üyeler: Abdüssamet KANDEMİR, İnayet Özge AKSU, Ahmet Kerem KÖSEOĞLU,
Mahmut AKSOY, Süleyman Seyyit ÜSTÜNDAĞ

Gözlemci Üyeler: Battal ÖZYURT, Tuğçe DEMİRDELEN, Burcu SAKALLIOĞLU

İçindekiler Tablosu

İçindekiler Tablosu.....	2
Şekiller Tablosu.....	3
Tablo Listesi.....	5
1. Giriş.....	6
2. Literatür Özeti	7
3. Kapsam.....	12
4. Faz Kaydırıcı Transformatör	13
5. Analizler	16
5.1. Kullanılan Veriler	16
5.2. Sezgi-Üstü Algoritmalar	24
5.3. Matematiksel Yöntem.....	28
5.4. Batı Anadolu Bölgesinde 400/154 kV FKT incelemesi	32
5.5. 400 kV Gerilim Seviyesinde FKT İncelemesi	33
6. Faz Kaydırıcı Transformatör Teknik Şartname Parametreleri.....	42
6.1. Önemli Tasarım Hususları	42
6.2. Ek Öneriler.....	43
6.3. Teknik Data Sayfası.....	44
Kaynakça.....	47

Şekiller Listesi

Şekil 1 Gana şebekesinde kapasite arttırımında FKT kullanımı örneği.....	13
Şekil 2 İki aktif kısımda üretilmiş, ara bağlantı ile bağlanan FKT'ler [45].	14
Şekil 3 Kaynaklara göre Türkiye Elektrik Kurulu Gücü.....	16
Şekil 4 Üretimin kaynaklara göre dağılımı (2019).....	16
Şekil 5 Üretimin kaynaklara göre dağılımı (2020).....	17
Şekil 6 RES kapasite faktörü (2019).....	18
Şekil 7 RES kapasite faktörü (2020)	18
Şekil 8 RES kapasite faktörü histogramı (2019).....	19
Şekil 9 RES kapasite faktörü histogramı (2020).....	19
Şekil 10 Ulusal minimum yük ile RES kapasite faktörü karşılaştırılması (2019)	20
Şekil 11 Ulusal minimum yük ile RES kapasite faktörü karşılaştırılması (2020)	20
Şekil 12 Çanakkale ve Balıkesir illerinde minimum yük ve maksimum rüzgar karşılaştırması (2019)	21
Şekil 13 Çanakkale ve Balıkesir illerinde minimum yük ve maksimum rüzgar karşılaştırması (2020)	21
Şekil 14 (a) Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasına ait akış diyagramı, (b) Ateşböceği algoritmasına ait akış diyagramı	25
Şekil 15 Sezgi-üstü algoritmalar için oluşturulan birey yapısı	27
Şekil 16 Basit bir sisteminde güç kayma örneği	28
Şekil 17 Dağılım faktörü örneği.....	29
Şekil 18 Problemin çözümü için tasarlanan algoritma	30
Şekil 19 Muhtemel FKT pozisyonları.....	34
Şekil 20 RES60TES2 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 2 FKT'nin konum ve açısı	35
Şekil 21 RES60TES2 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 3 FKT'nin konum ve açısı	36
Şekil 22 RES70TES2 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 3 FKT'nin konum ve açısı	37
Şekil 23 RES80TES1 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 3 FKT'nin konum ve açısı	37
Şekil 24 RES80TES2 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 3 FKT'nin konum ve açısı	39

Şekil 25 RES80TES2 senaryosu 2.Durumda elde edilen optimal çözüme göre 4 FKT'nin konum ve açısı.....	39
Şekil 26 RES80TES2 senaryosu 3.Durumda elde edilen optimal çözüme göre 4 FKT'nin konum ve açısı.....	40

Tablo Listesi

Tablo 1 Çanakkale İlinin Bir Bölümünde Bulunan Rüzgâr Santrallerinde Gerçekleşecek Tahmini Kapasite Artışı	22
Tablo 2 Kısıt performansında başlangıç koşulları ile PSO ve AA sonuçlarının karşılaştırılması	33
Tablo 3 FKT Teknik Data Sayfası örnek parametreleri	44
Tablo 4 Ototransformatör ile Faz Kaydırmalı Ototransformatörün Boyut ve Ağırlıkları.....	46

1. Giriş

Ülkemizde enerjiye olan talebin yükselmeye devam etmesi nedeniyle enerji üretimini, iletimini ve dağıtımını sosyal refahı iyileştirebilmek amacıyla genişletecek ve çeşitlendirecek kayda değer yatırımlar yapılmaktadır. Bilindiği gibi İletim Sistemi, üretim ve tüketim birimleri arasında köprü görevini üstlenmekte ve enerji sisteminin güvenliğini tesis etmektedir. İletim sisteminde yaşanacak kısıtlar, hem tüketicileri hem de üretim birimlerini derinden etkileyecek öneme sahiptir. Bu nedenle iletim sistemi, üretim ve tüketim tarafında gerçekleşen değişikliklere ayak uydurmak zorundadır.

Türkiye Elektrik İletim Sistemine bağlı üretim birimleri arasında geleneksel santrallerin yanı sıra Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK) olan hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerji sistemleri giderek yaygınlaşmaktadır. YEK'in iletim sisteminin ihtiyaç duyduğu noktalar yerine doğal kaynağın uygun olduğu bölgelere kurulması iletim sistemi açısından önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Türkiye'de iletim sisteminin tek yetkilisi olarak Türkiye Elektrik İletim AŞ (TEİAŞ) YEK'in sebep olduğu problemleri çözecek yatırımları yapmakla sorumludur. Ancak genellikle iletim alt yapısını geliştirmek için gerekli olan yatırım süresi YEK'in kurulmasından çok daha fazla olduğu için iletim sisteminde arz güvenliği açısından çeşitli kısıtlar ortaya çıkabilmektedir. Diğer taraftan, enerjiye olan talebin büyük şehirlerin merkezinde daha yüksek oranda artması ve buralarda iletim alt yapısını genişletecek yeterli alanın bulunmaması, çözüm bulunması gereken başka bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. YEK'in fiziki sistem bağlantısında yaşanan bu gecikmeler sadece TEİAŞ'a özel bir problem değildir. Birleşik Krallık ve ABD iletim sistemlerinde de bazı YEK santrallerinin iletim altyapısını 10 yıldan fazla süre beklediği projelerin bulunduğu bilinmektedir.

İletim sisteminin karşılaştığı problemleri altyapıyı genişletmeden ve fakat mevcut altyapıyı daha esnek şekilde kullanarak çözmeye yönelik geliştirilmiş olan tristör kontrollü seri kapasitör ve statik var kompanseör gibi Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (EAAİS) ekipmanları çeşitli ülkelerde yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Araştırmacılar EAAİS'ı, kullanılabilir iletim kapasitesini artırmak, işletmesel maliyetleri düşürmek, sistem N-1 güvenliğini sağlamak, gerilim bozulmalarının önüne geçmek ve statik kararlılığın yanında dinamik kararlılığa yardım etmek gibi farklı konuları veya bu konuların birlikte kullanılarak oluşturulmuş kombinasyonlarını çözmek amacıyla kullanmıştır. Diğer taraftan, Avrupa'da liberalleşen enerji ticareti ile birlikte ülkeler arasında gerçekleşen enerji geçişlerinin kontrol edilmesi bir zorunluluk olarak ortaya çıkmış ve bu sorunu çözebilmek için ülkeler arasındaki sınır bağlantılara 1930'lu yıllarda keşfedilen Faz Kaydırıcı Transformatörler (FKT) hızla entegre edilmeye başlanmıştır. Geleneksel EAAİS olarak gösterebileceğimiz FKT'ler yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla birlikte aktif güç kontrolünü sağlamak amacıyla sınır ötesi ticaretin yanı sıra şebeke içinde de çeşitli amaçlar doğrultusunda kullanılabilmektedir.

2. Literatür Özeti

Enterkonnekte iletim sistemini işletmek, giderek karmaşık bir yapıya bürünen ağ yapısı ve teknolojik gelişmelerle ortaya çıkan yeni problemlere paralel olarak zorlaşmaktadır. Esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) teçhizatları, karşılaşılan yeni zorlukları çözmek amacıyla yaygın şekilde kullanılan etkili bir yöntemdir. FACTS teknolojisi ile iletim sistemi operatörleri enerjiye yön verme fırsatını elde ederek, arz güvenliğini tehdit edecek durumları ortadan kaldırma, iletim sistemi transfer kapasitesini artırma, gerilim profilini düzeltme ve dinamik kararlılığı iyileştirme gibi çeşitli alanlarda karşılaşacağı zorlukları hafifletmektedir. Genel itibarıyla FACTS cihazları yüksek gerilim tesislerinde kullanılan yarı-iletken teknolojisiyle donatılarak otonom kullanıma sunulmuş olsa da manuel kontrol ile enerjiye yön vermenin mümkün olduğu cihazlar da bulunmaktadır. Faz Kaydırıcı Transformatörler(FKT) bu anlamda yaygın şekilde kullanım alanı bulmuştur.

İki bara arasında gerçekleşen aktif güç akışı, iki bara arasındaki gerilimin genlik ve açı farkı ile baralar arasındaki bağlantıyı sağlayan iletim koridorunun empedansına bağlı olarak değişmektedir. FKT'ler faz açısını değiştirerek aktif güç kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılmaktadır [1]. İletim sisteminde esnek kontrol imkânı vermesi nedeniyle FKT'ler FACTS cihazları arasında gösterilmektedir [2,3]. FKT'ler temel olarak 4 farklı karakteristikte sınıflandırılmaktadır. Bunlar Direkt, İndirekt, Asimetrik ve Simetrik'tir. Direkt FKT'ler 3-faz tek çekirdektir ve sargıların birbirine uygun şekilde bağlanmasıyla faz kayması elde edilir. İndirekt FKT'ler ise 2 ayrı transformatör kullanılarak oluşturulur. Bunlardan biri dik gerilim bileşeninin genliğini regüle etmek için kullanılan uyartım transformatörü iken, diğeri dik gerilim bileşenini hat gerilim bileşenine entegre etmek için kullanılan seri transformatördür. Asimetrik FKT'ler hem faz açısının hem de genliğinin değişmesine yol açarken, Simetrik FKT'ler aynı genlikte faz açısını değiştirebilir. Bu karakteristikler kullanılarak 4 farklı FKT kategorisi oluşturulabilmektedir. Bunlar Direkt Asimetrik, Direkt Simetrik, İndirekt Asimetrik ve İndirekt Simetrik FKT'lerdir [4].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ülkeler arası enerji ticaretini kontrol etmek amacıyla FKT kullanımının yoğunlaştığı açıktır. FKT'nin modellemeye esas teknik özelliklerini araştıran, tasarım ve test süreçlerini inceleyen çalışmaların yanı sıra FKT'nin koruma sistemine yönelik yeni metodların kullanıldığı görülmektedir. FKT'ler arası koordinasyonun sağlanması amacıyla ekonomik ve teknik analizlerin, optimizasyon algoritmalarının yaygın şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu nedenle FKT'ler çeşitli alanlarda farklı hedefler doğrultusunda yaygın olarak kullanılan etkili bir FACTS teçhizatıdır. Ayrıca manuel kontrolün ötesinde, yarı-iletken teknolojisinin kullanıldığı FKT'ler de bulunmaktadır [5].

Çeşitli güç sistemlerinde FKT gereksinimini araştıran çalışmalar yürütülmüştür. Çek Cumhuriyeti iletim sisteminde FKT'lerin uygun karakteristik, ana parametreleri ve lokasyonları bakımından uygulanma olasılığı araştırılmıştır. Yerleştirilecek FKT'nin komşu ülke güç sistemleri üzerindeki etkisi de irdelenmiştir. Yapılan araştırmada 800-1000 MVA ve 400 MVA gücündeki FKT'lerin güç sistemindeki davranışları analiz edilmiştir. Araştırma neticesinde ilgili bölgede FKT'nin etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca FKT'nin diğer aktif güç kontrol teçhizatlarına göre daha etkili olduğu ve FACTS cihazlarına göre daha ucuz olduğu belirtilmiştir. Ancak güç elektroniği elemanlarına dayalı olan FACTS teçhizatlarına göre daha yavaş olduğu vurgulanmıştır. Dolayısıyla hızlı cevap karakteristiğine

ihtiyaç olmayan durumlar için FKT'nin çok kullanışlı olduğu belirtilmiştir [6]. Hindistan güç sisteminde aktif güç kontrolü yapmak için kullanılan 315 MVA kapasiteli ilk FKT'nin tasarım, üretim, test ve devreye alma süreçleri sunulmuştur [7]. Gronau'da 1400 MVA güç kapasitesine ulaşan FKT'lerin iletim sistemine etkisi araştırılmıştır [8]. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör, Statik Senkron Seri Kapasitör ve FKT olmak üzere üç FACTS teçhizatıyla Romanya iletim sisteminde aktif güç kontrolü benzetim çalışmaları yürütülmüştür [9].

Yüksek güçlü FKT'lerin ana kullanım alanı uluslar-arası (sınır-ötesi) bağlantı hatlarında gerçekleşen beklenmedik güç transferlerini önleyecek kontrol stratejilerinin kurulması yönündedir. Bu doğrultuda, Tunus-Cezayir bağlantı koridorunda bulunan paralel Enerji İletim Hatlarında (EİH) gerçekleşen planlanmamış güç akışlarını kontrol edebilmek amacıyla modellenen bir FKT uygulanmıştır [10]. Sınır ötesi güç akışlarını kontrol etmek amacıyla Belçika şebekesinin kuzeyine yerleştirilen 1400 MVA'lık üç adet indirekt asimetrik FKT'nin, güç sisteminin güvenilirliği üzerinde önemli bir rol oynadığı bir diğer örnek uygulama olarak gösterilebilir [11]. Yine Belçika ve Fransa arasında bağlantı Transformator Merkezi (TM) olan Monceau'da EİH'lerin aşırı yüklenmesini önlemek amacıyla uygulanan 400 MVA'lık FKT, N-1 güvenliğini sürdürmek amacıyla gerçekleştirilen uygulamalardan biridir [12]. İtalyan şebekesi Camporosso TM'de Fransa şebekesi ile yapılan enerji ticaretini kontrol edebilmek amacıyla 450 MVA gücünde bir FKT konuşlandırılmıştır. İkisi Foggia ve ikisi Villanova olmak üzere 4 adet 1800 MVA çift çekirdek simetrik iki-yönlü seri bağlı FKT Adriyatik üzerindeki aktif güç kontrolünü sağlamak amacıyla sisteme entegre edilmiştir [13]. FKT'nin Polonya güç sisteminin sınır-ötesi iletim kapasitesi üzerindeki etkileri ile 2014-2020 yılları arasında Avrupa'da enterkonnekte güç sistemi modelleri araştırılmıştır. FKT'nin kullanımının özellikle acil durumlarda oldukça faydalı olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada Polonya İletim Sistemi Operatörünün Almanya ve Polonya güç sistemleri arasında gerçekleşen enerji akışını kontrol edebilmek amacıyla Krajnik ve Mikulowa TM'lere FKT kurulmasına karar verdiği belirtilmiştir. Önerilen FKT'lerin en az 750-1000 MVA nominal güce sahip olması gerektiği açıklanmıştır. Sınır-ötesi hatlarda kurulan FKT'lerin 40° açı ayarıyla Polonya'ya giren aktif gücü 1100 MW düşürdüğü paylaşılmıştır. Benzer değişimi elde edebilmek amacıyla Polonyo'da üretimi yaklaşık olarak 2200 MW yükselterek Almanya'da da aynı oranda azaltmak gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle Polonya ve Almanya arasında sınır-ötesi hatlar üzerine kurulacak FKT'lerle birlikte Avrupa'da daha güvenli bir güç sistemine ulaşılacağı sonucuna varılmıştır [14]. Kuzey İrlanda ile İrlanda Cumhuriyeti arasındaki bağlantıyı güçlendirmek amacıyla kullanılan 125 MVA FKT'nin şartname ve kontrolü sunulmuştur [15]. Türkiye, İran ve Suriye bağlantılarında aktif güç kontrolü bakımından SVC ve FKT'nin benzetim ortamında karşılaştırılması yapılmış ve bu üç şebekenin birbirleriyle olan bağlantı hatları üzerinde kullanılacak 1000 MVA'lık FKT'lerin etkin aktif güç kontrolü sağladığı görülmüştür [16]. Hollanda-Almanya şebekelerinin bağlandığı Meeden TM ve Fransa-İtalya bağlantısının olduğu La Praz TM gibi Avrupa ülkeleri arasındaki güç akışını optimize etmek amacıyla yine FKT kullanılmıştır[17].

ENTSOE'de (European Network of Transmission System Operators for Electricity) gözlemci üye olan ve bu birliğin kurallarına tabi olan Türkiye'nin, ENTSOE üyesi olmayan komşuları ile ancak B2B (Back-to-Back) sistemi aracılığıyla bağlantı sağlaması mümkün olduğundan, Türkiye'nin doğu komşularıyla FKT üzerinden bağlanması söz konusu değildir. Diğer taraftan, Türkiye'nin senkron bağlı olduğu ve ENTSOE üyesi olan komşuları Yunanistan ve Bulgaristan ile ihtiyaç olması halinde FKT aracılığıyla aktif güç kontrolü yapılması mümkündür.

FKT'nin teknik özellikleri ile tasarım ve test prosedürlerinin de sunulduğu araştırmalar yürütülmüştür. Hollanda'nın Meeden TM'sinde kullanılan 1000 MVA'lık FKT'nin teknik özellikleri, tasarım kısıtları ve diferansiyel koruma yaklaşımının yanı sıra işletmesel hususları sunulmuştur[18]. İtalyan şebekesinde tasarım kriterleri, dielektrik test ve termal fabrika testleri sırasında karşılaşılan özel problemler, koruma amacıyla ihtiyaç duyulan parafudr seçimi gibi süreçleri ihtiva eden FKT uygulamalarından bahsedilmiştir [17]. Yine bu şebekede güç akışı optimizasyonu ve sistem güvenliğini artırmak için yapılan bir başka çalışmada FKT'lerin tasarım, üretim, test ve modelleme kriterleri tartışılmıştır [19]. 800 ve 1200 MVA FKT'nin tasarım ve test prosedürleri paylaşılmıştır [20] ve iletim sistemine yerleştirilecek iki adet 1800 MVA FKT'nin modellemesi ve elektromanyetik transient analizleri sunulmuştur [21].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla birlikte meydana gelen kontrol edilemeyen kesikli güç akışları, iletim sisteminde esnek kontrol teknolojisine olan ihtiyacın artmasına yol açmıştır. Aslında özellikle Avrupa güç sisteminde sınır-ötesi hatlardaki güç akışlarını kontrol etmek için uygulanan FKT'lerin bir bölümü aynı zamanda yenilenebilir enerji üretimleri nedeniyle meydana gelen dengesizlikleri ortadan kaldırma amacıyla da kullanılmıştır. Ancak doğrudan yenilenebilir kaynaklı yüklenme problemlerine FKT ile çözüm arayan çalışmalar da bulunmaktadır. Bunlardan birisi Kuzey Denizi bölgesinde yoğunlaşan rüzgâr santrallerinin Avrupa'nın genelini etkileyen problemlere yol açmasıdır. Örneğin açık deniz rüzgâr santralleriyle üretilen enerji, yüksek miktarda tüketim karakteristiğine sahip olan Almanya'nın güneyine ulaşmak için Polonya – Çek koridoru yerine empedansı daha düşük olan diğer koridorları kullanarak aşırı yüklenmelere neden olmaktadır. Bunun önüne geçecek aktif güç kontrolünü sağlayabilmek amacıyla Polonya – Çek güç sistemleri arasında bulunan Çek Cumhuriyetinin 400 kV Nosovice TM'sine 2005 yılında FKT yerleştirilmiştir [22]. Yine yüksek rüzgâr üretiminin bulunduğu bölgelerde kısıt yönetimini sağlayabilmek amacıyla FKT boyutunun belirlendiği bir çalışmada, sezona göre değişen yük profili dikkate alınarak sınır bağlantı hattı için 400 MVA gücünde bir FKT önerilmiştir [23]. Romanya şebekesi üzerinde yapılan simülasyon sonuçlarına göre kullanılan FKT'nin aktif güç kontrolünde etkili olduğu ve yoğun rüzgâr üretiminin bulunduğu Dobrogea bölgesindeki güç transferiyle ilgili problemleri çözebileceği belirtilmiştir [9]. Sadece rüzgâr santrallerinin yoğunlaştığı bölgelerde değil aynı zamanda geniş çaplı güneş panellerinin bulunduğu bölgelerde de aktif güç kontrolünü sağlamak amacıyla FKT önerilmiştir [24].

Avrupa geneline yerleştirilen FKT'ler ile sisteme eklenmesi planlanan önemli miktarda FKT'nin birbirlerine karşı işletilmesi riskinin doğduğu açıktır. Bu nedenle FKT'ler arasında koordinasyonu sağlayacak kontrol yaklaşımlarına sahip olmak, güç sisteminin güvenliği bakımından son derece önemlidir [15]. Literatürde FKT'ler arası koordinasyonu hedef alan çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda FKT'nin önceden belirlenen N-1 kısıtlarıyla başa çıkabilecek ve işletme maliyetlerini düşürecek şekilde çalışmasını sağlayacak gerçek-zamanlı otomatik kontrol yöntemi önerilmiştir [25]. İtalyan şebekesi üzerine yapılan çalışma kapsamında şebekenin önemli bir lokasyonunda bulunan Randissone TM'de 528 MVA gücündeki 2 adet FKT'nin detayları sunulmuştur. FKT'nin İtalyan şebekesinin kuzeyine olan etkisi, La Praz FKT ile koordinasyonu, FKT'nin durum takibi ve bakım çalışmaları paylaşılmıştır [17].

FKT'nin ekonomik analizi ile sisteme entegre edildiğinde meydana gelebilecek farklı problemler de araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Biri Avrupa güç sisteminin Kuzey Afrika üzerinden yapılan elektrik enerjisi ithalatına uygunluğunu ele alan, diğeri ise bunun 2030'daki

etkilerini araştıran iki stratejiye dayalı olarak yapılan teknik ve ekonomik analizler sunulmuştur. Önerilen yaklaşımlar göstermektedir ki Avrupa’da elektrik fiyatlarını düşürecek bu tasarımlar uygulanabilir [36]. Seri kapasitör merkeziyle birlikte 2000 MVA’lık çift-çekirdek asimetrik FKT’nin Büyük Britanya güç sistemine entegre edilmesi halinde meydana gelebilecek sub-senkron rezonans ihtimali araştırılmıştır. Kullanılan FKT’nin modellemesi ve işletmesi benzetim çalışmalarıyla sunulmuştur. Çalışma neticesinde FKT ayar sargılarında yapılan kademe değişimlerinin, seri kapasitör merkezi kapasitansının senkron generatör şaftının doğal moduna yakın bir değere ayarlanması durumunda sub-senkron rezonansı tetikleyebileceği sonucuna varılmıştır [27].

FKT’nin koruma felsefesi araştırmacıların dikkatini yoğun olarak çeken inceleme alanlarından olmuştur. FKT tasarım portföyünün az olması nedeniyle IEEE yayınının [28] hangi durumlarda yanlış olduğunu göstermek ve çift-çekirdekli FKT için 87T diferansiyel rölelerine göre tasarım ve ayar klavuzunun elde edilmesi amacıyla bir çalışma önerilmiştir. Bu doğrultuda 32 ileri ve 32 geri olmak üzere 64 kademesi bulunan ve $\pm 40^\circ$ ayar aralığına sahip, 600 MVA çift-çekirdek ve simetrik bir FKT için koruma şeması sunulmuştur [29]. 150 MVA gücünde Delta-altıgen bağlantı şekline sahip bir FKT’nin tasarım özellikleri tanımlanmış ve koruma felsefesi ortaya konulmuştur [30]. En çok kullanılan türler olan 480 MVA gücünde çift çekirdek simetrik ve 150 MVA gücünde delta-altıgen FKT’lerin dahili veya harici arızalarda korunması amacıyla yeni bir yönlü karşılaştırma tabanlı ayırım yöntemi önerilmiştir [31]. Yine koruma davranışını iyileştirecek başka bir çalışma çift-çekirdek simetrik bir FKT için önerilmiştir [32]. 300 MVA güce sahip indirekt simetrik bir FKT için iç arıza dışında değişen işletme koşullarına dayalı olarak gerçekleştirilecek FKT’nin diferansiyel röle vasıtasıyla servis harici olmasının önüne geçmek amacıyla yeni bir koruma tekniği önerilmiştir [33]. 300 MVA güç kapasiteli indirekt simetrik FKT’de inrush akımı ile iç arıza akımlarını ayırt edebilmek amacıyla dalgacık dönüşümü tabanlı bir yöntem önerilmiştir [34]. FKT’nin diferansiyel korumasını araştıran bir diğer çalışmada 250 MVA tek çekirdek simetrik FKT üzerine incelemeler yapılmıştır [35].

FKT’nin optimizasyonu iletim sisteminin kapasitesinin artırılması ve sistem güvenliği ile kararlılığının iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir. FKT’nin tasarım süreci kadar entegre edileceği konum ile işletileceği kademe bilgilerinin elde edilmesi de çözülmesi gereken önemli bir problemidir. Bu doğrultuda FKT konumu ve açısının belirlenebilmesi amacıyla çeşitli optimizasyon teknikleri yaygın şekilde kullanılmıştır. Örneğin 480 MVA gücündeki bir FKT, optimal güç akışı ve genetik algoritma sonuçlarına göre konuşlandırılmıştır [26]. Java Bali’nin 500 kV güç sisteminde Tristör Kontrollü FKT’nin optimal konumu ve gücünü bulmak amacıyla Yerçekimsel Arama Algoritması kullanılmıştır [37]. Bulanık PSO tekniği IEEE 30-baralı test sistemi üzerinde hat yüklenmelerini düşürmek amacıyla FKT’nin optimal konumu ve açısını belirlemek amacıyla kullanılmıştır [38]. Bulanık GA tabanlı çok amaçlı bir optimizasyon algoritması kullanılarak planlanmamış güç akışlarını azaltmak amacıyla FKT ve seri kapasitör konumlarının etkisini gösteren bir araştırma sunulmuştur. Matlab programı kullanılarak gerçekleştirilen analizler IEEE 30-baralı test sistemi üzerinde uygulanmıştır [39]. Düzeltici faaliyetler arasında FKT’lerin de bulunduğu yeni bir Doğru Akım Optimal Güç Akışı formülasyonu önerilmiştir. Önerilen yöntem IEEE-RTS 24-baralı test sistemi üzerinde çalışılarak optimal yeniden üretim yapılandırması ve yük atma problemlerine FKT’nin etkisi entegre edilmiştir [40]. Güç sisteminde gün öncesi planlama safhasında FKT’lerin kademelerini optimize etmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmada market şartlarına uygun olacak optimal FKT açılarının belirlenmesi amaçlanmıştır [41]. Lineer programlama optimizasyon yöntemi

önleyici ve düzeltici önlemler için FKT'lerin kademe koordinasyonlarını optimize etmek amacıyla kullanılmıştır [42].

3. Kapsam

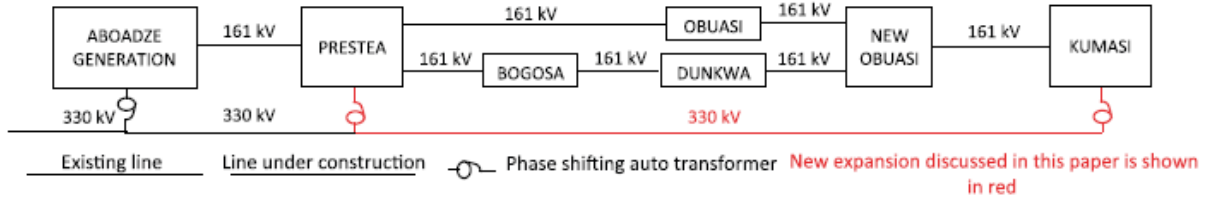
Enerji iletim sisteminde aktif ve reaktif güç akışları sistemde bulunan ekipmanların doğal empedansına göre gerçekleşir. Şebekenin elektriksel parametreleri düzenlenerek bu güç akışlarını kontrol etmek mümkündür. Esnek alternatif akım iletim sistemi teçhizatları iletim ağında dolaşan bu güç akışlarını kontrol etmek için kullanılırlar. EAAİS cihazları güç elektroniği teknolojisinden aldığı kabiliyetle anlık değerlendirme ve düzenleme yaparak güç sisteminin direncini ve güvenilirliğini artırmaktadır. Her ne kadar güç elektroniği ekipmanlarının kullanıldığı versiyonu bulunsa da çalışmamızın odağı olan geleneksel Faz Kaydırıcı Transformatörler ile şebekenin spesifik bir bölgesinde aktif güç kontrolü yapılabilmektedir.

FKT'lerin ENTSO-E sisteminde genellikle ülkeler arası bağlantı hatlarında ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğun olduğu bölgelerde aktif güç akışını yönlendirmek için kullanıldığı görülmektedir. Literatürde gerçekleştirilen bazı araştırmalarda ise iletim ağının enerji taşıma kapasitesini artırmak için FKT'nin kullanıldığı gözlemlenmektedir. Ülkemizde şebekemizin yapısı nedeniyle henüz herhangi bir EAAİS teknolojisi aktif ve yaygın olarak kullanılmamaktadır. Enerjiye olan talebin artmasına paralel olarak sürekli genişleyen iletim ağımızda gerek yaygınlaşan yenilenebilir enerji kaynakları gerek uzak mesafelere iletilmesi gereken enerjinin sağlandığı klasik üretim tesisleri nedeniyle sistemde oluşan darboğazların çözümü noktasında FKT ihtiyacının araştırılması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında hem 400 kV gerilim seviyesinin doğu-batı koridorundaki muhtemel darboğazların hem de bazı 400/154 kV geçişlerde oluşan yoğunlukların rahatlatılması amacıyla FKT'nin statik olarak uygunluk analizlerinin yapılması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin tamamı şebekemizin 2025 vizyonunda öngörülen yatırımların uygulandığı varsayımıyla çeşitli mevsimsel etkiler gözetilerek farklı veri setleri ile yapılmıştır. Araştırmanın içeriğinde FKT konumunun sadece deneme-yanılma yöntemine dayalı olarak değil aynı zamanda özellikle rüzgar üretiminin yaygınlaştığı bölgelerde sezgi-üstü optimizasyon yöntemlerinden faydalanarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Ancak şunu belirtmekte fayda var ki sistem modelleri yeni santral projeleri, tüketim transformatör merkezleri, talep tahminleri ve yeni şebeke yatırımlarına bağlı olarak her yıl değişmektedir. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, üzerinde çalışılan planlama veri setini yansıtmaktadır ve güncellenen planlama modellerini yansıtmayabilir.

4. Faz Kaydırıcı Transformatör

Faz Kaydırıcı Transformatörler (FKT) gerek şebekeler arası bağlantı hatlarında gerek şebeke içi darboğazların genişletilmesinde aktif güç kontrolü sağlamak amacıyla yaygın şekilde kullanılan teçhizatlardır. FKT'ler paralel iletim koridorlarında yük paylaşımı, N-1 güvenliğini ihlal etmeden iletim sistemi transfer kapasitesinin yükseltilmesi, arıza sonrası aşırı yüklenmelerin ve planlanmayan güç transferlerinin önlenmesiyle sistem güvenilirliğinin artırılması, yenilenebilir enerji kaynakları gibi yeni üretim tesislerinin şebekeye bağlanması ve büyük çaplı üretim tesislerinin neden olduğu şebeke darboğazlarının ortadan kaldırılması amaçları doğrultusunda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Aktif güç kontrolü, tristör kontrollü seri kapasitör gibi EAAİS teçhizatları kullanılarak da sağlanabilmektedir. Ancak bazı senaryolarda şebekede FKT kullanmak, görece daha uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. FKT çalışma mantığında, hattaki faz açısının ayarlanması suretiyle iki gerilim arasında oluşacak açı farkından faydalanarak enerji akışına yön verme işlemi yatmaktadır [43].



Şekil 1 Gana şebekesinde kapasite arttırımında FKT kullanımı örneği

FKT transformatörleri ototransformatör tasarımıyla birleştirilerek de üretilebilmektedir. Bu şekilde değerlendirildiğinde fiyat ve kayıp olarak oldukça avantajlı konuma gelebilmektedirler. Sürekli rejimde işletmenin ihtiyaç duyacağı faz açıları hesaplanmalıdır. Bu açılar çift yönlü olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Transformatör tasarımında bu açı değişimleri sargı gerilimi ekleme-çıkarma metodu ile Yük Altında Kademe Değiştiriciler (OLTC) vasıtasıyla elde edilmektedir. Gerilime göre istenilen ayar açısı, gerilimin yüzdesi ile hesaplanmaktadır. 161 kV'luk bir sargıda 3° ayar yapabilmek için 12kV devreye alıp çıkarabilmek gerekmektedir [44]. Bazı FKT tasarımlarında çift aktif kısım kullanılabilmektedir. Ayar açısının genişliğine göre aktif kısım ve sargı sayısı artırılması gerekebilmekte ve bu durum şebeke yeteneğine göre değişmektedir. Çoğu FKT transformatörü hem gerilim değiştirip, hem de gerilim açısı değiştirmemektedir. Pratikte uygulanmış olmasa da teorik olarak $\pm 85^\circ$ değerlerine ulaşılabilceği düşünülmektedir. İki aktif kısım olması halinde iki ayrı tankın birbirine bağlanması ya da tek tankta iki aktif kısmın birbirine bağlanması değerlendirilebilmektedir.

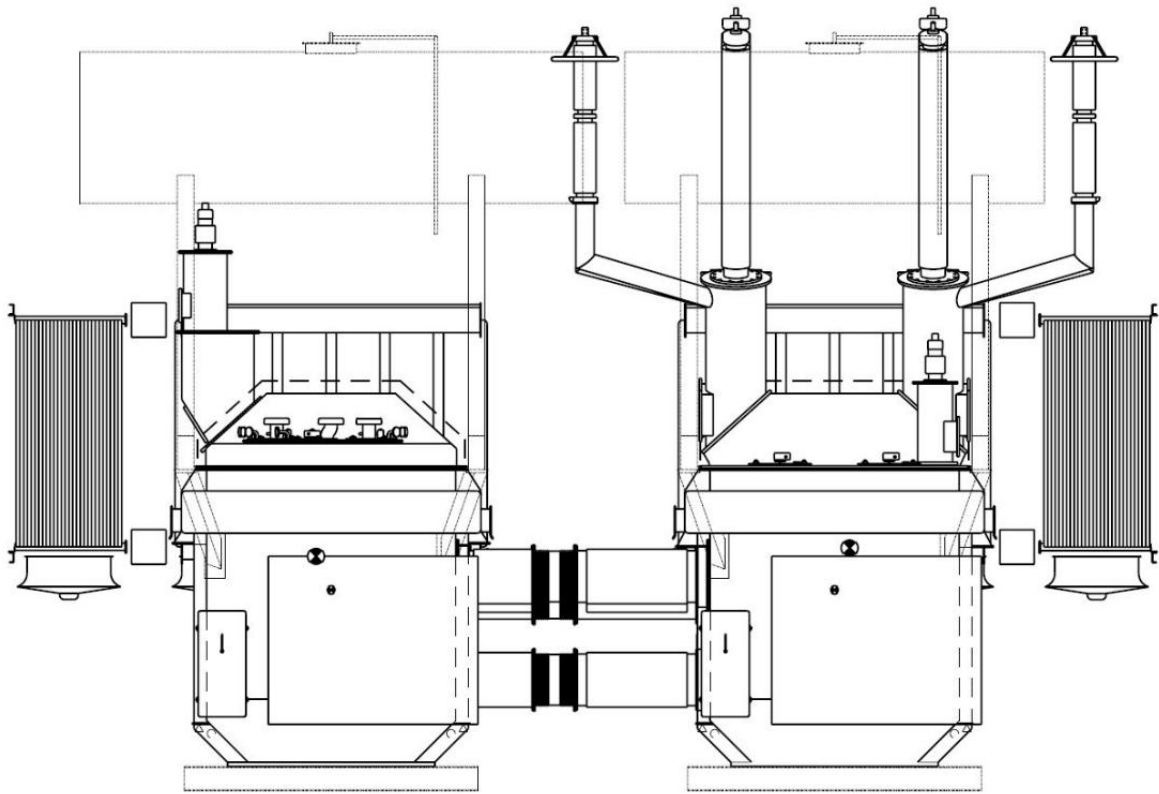
Tek çekirdekli yapılarda birkaç metot mevcuttur. İlk olarak 20° altı açılarda faz kaydırma için kullanılan ve genellikle orta gerilim ($<40\text{kV}$) ve 300MVA altındaki güçlerde tercih edilen çift sargılı tek çekirdekli FKT'ler bulunmaktadır. Hat ve faz regülasyonu sağlayıp OLTC'nin yıldız noktasında olması ile maliyet avantajı da oluşturulabilmektedir. Ancak çok fazla uç çıkışı, bağlantı yapısını karmaşık olmasına neden olmaktadır. Tek çekirdekli çözümler arasında en maliyetli tasarım olsa da, çift çekirdekliyle kıyasla maliyet bakımından daha uygundurlar.

Simetrik ve asimetrik olarak üretilebilen tek çekirdekli uzatılmış üçgen çözümleri (extended delta), istenilen faz açısına göre güç limitine takılabilmektedir. Üçgen sargıların genişletilmesinden dolayı 230 kV üstü gerilimlerde tercih edilmezler. Asimetrik yapıda olan uzatılmış üçgen yapısı genelde 15° 'ye kadar olan çözümlerde kullanılır. Asimetrik uzatılmış

üçgen, simetrik üçgene kıyasla daha uygundur. Bu sistemlerde OLTC'ler faz girişinde olduğundan, şebekenin ilk etkilediği ekipmanlar olacaklardır. Asimetrik uzatılmış üçgende tek ayar sargısı ile çözüm üretilebilirken, simetrik olanda iki ayar sargısına ihtiyaç vardır.

Tek çekirdekli çözümlerde son zamanlardaki ilgi ile birlikte kullanılan hexagonal çözüm de bulunmaktadır. 230 kV altı kullanılan bu çözümde tek ayar sargısı ile simetrik çözüm elde etmek mümkün kılınmıştır. Fiyat ve hacim olarak da az yer kaplayan bu transformatörlerin üretimsel ve tasarımsal zorlukları, artan ayar sahası ile birlikte yükselmektedir. Ayrıca uzatılmış üçgen metodundaki gibi OLTC düzeneği sargı girişlerinde bulunduğundan, dış etkilere çok açıktır.

Çift çekirdekli (aktif kısım) yapılarda yardımcı trafo ile birlikte kullanılan çözümde 20°'ye kadar faz açısı ayarı yapılabilmektedir. Simetrik olmayan bu ayar yapısında çok büyük güçlere çıkmak mümkündür. Çift aktif kısımlı transformatörlerde nispeten uygun bir çözümdür. Diğer çözüm olan Quadrature Booster (dört eksenli yükseltici) transformatörler ise en yüksek maliyetli çözümlerdir. Her gerilim seviyesinde kullanılabilmesi ile tam çözüm sunmakta ve güç olarak çok üst seviyelere çıkılabilmektedir. Ayar sargısı ve OLTC nötr noktasında olduğundan güvenli yapıdadırlar. Düşük güçlü, dolayısı ile düşük akımlı çözümlerde tek kafa OLTC ile çözüm üretmek mümkündür [45].



Şekil 2 İki aktif kısımda üretilmiş, ara bağlantı ile bağlanan FKT'ler [45].

FKT'lerin günümüzde gerilimleri 765kV seviyelerine kadar çıkmıştır [46]. Ester yağ ile üretilmiş referans bir FKT 138kV seviyesinde Amerika'da denenmiştir. Ester yağlı çözümlerin FKT'ler üzerine doğrudan bir avantajı bulunmamakta, dizayn olarak önlemlerin alınması kaidesi ile ester yağın avantajları korunmaktadır [47]. Quadrature booster olarak 1200MVA

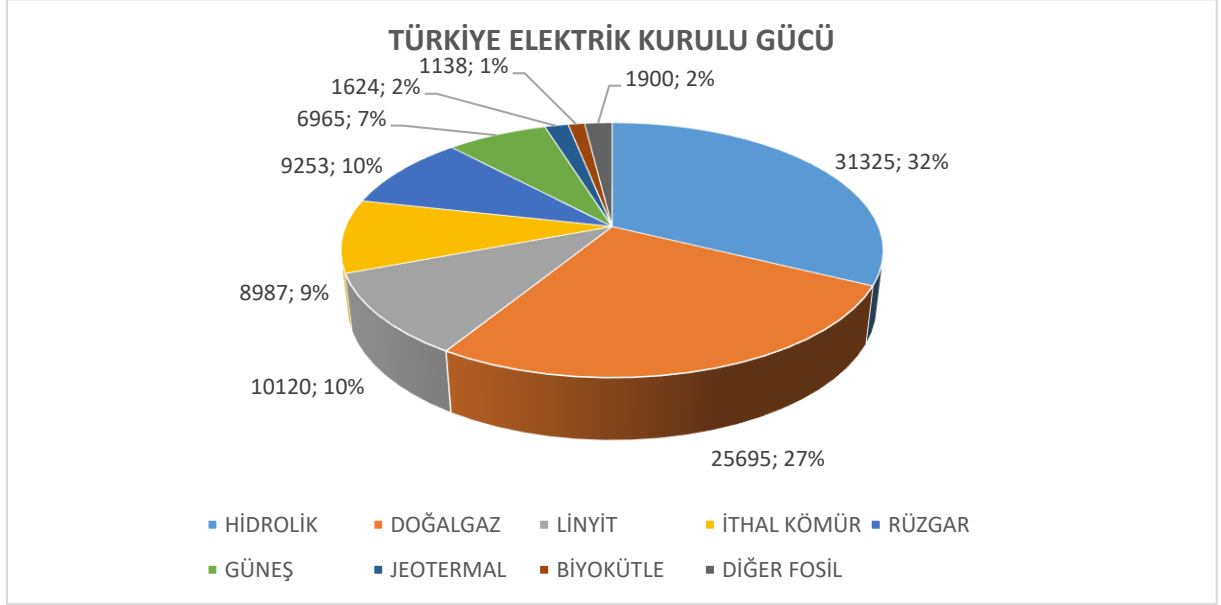
gücünde FKT'ler Almanya'da kullanılmaktadırlar [48], ancak kapasiteleri 2000 MVA'ya kadar çıkabilmektedir[49].

Faz Kaydırıcı Oto-transformatörlerde ayar sargısı nötrde olduğu zaman kademe pozisyonuna bağlı olarak değişken akı meydana gelmektedir. Bu da her kademedede sarım geriliminin değişerek IEC60076-1'de de belirtildiği üzere “Variable Flux Voltage Variation (Değişken Akı Gerilim Değişimi)” (VFVV) yapısının oluştuğu anlamına gelmektedir [50]. Standart tasarımlarda ise “Constant Flux Voltage Variation (Sabit Akı Gerilim Değişimi)” (CFVV) elde etmek mümkündür. Gana şebekesi için tasarlanan bir uygulamanın FKT tasarımında 289 ayar kademesi bulunmakta ve üzerine yerleştirilmiş 5 kademe değiştirici ile senkronize çalışabilmektedir [51].

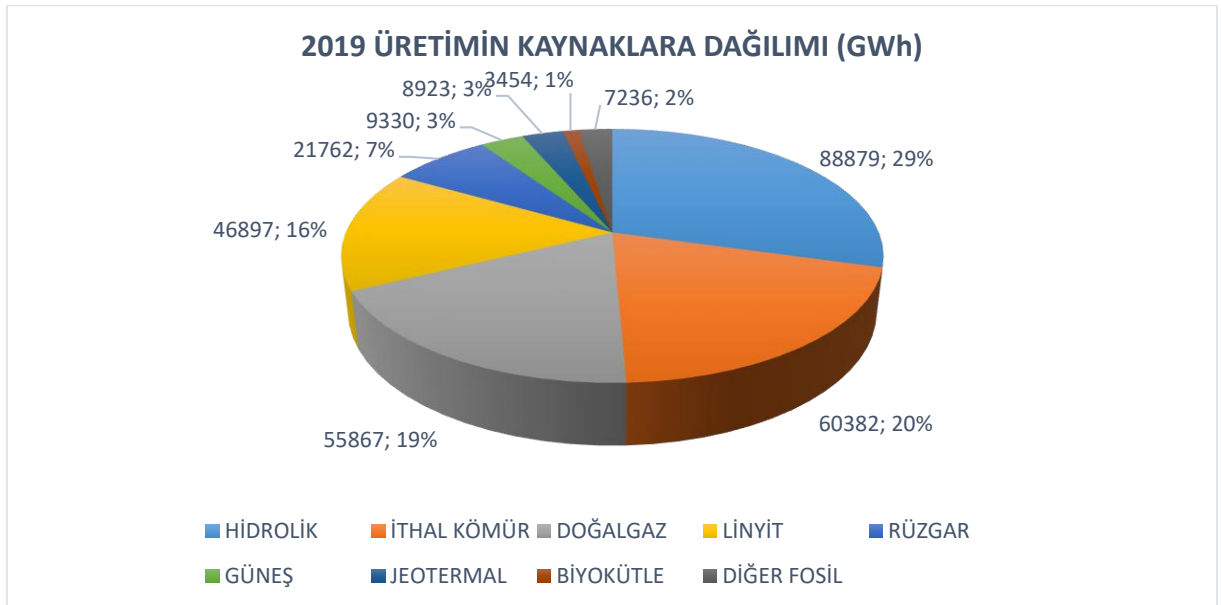
5. Analizler

5.1. Kullanılan Veriler

PST'nin kullanım alanlarından birisi de hızlı değişken üretim profiline sahip yenilenebilir enerji üretiminin iletiminde oluşabilecek kısıtların çözümüdür. Türkiye Elektrik İletim şebekesinde hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal kaynaklı yenilebilir üretim santralleri 13 Nisan 2021 itibariyle kurulu gücün %50,7'sini oluşturmaktadır. Türkiye elektrik kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı Şekil 3'te gösterilmektedir. Pastada rüzgâr santralleri 9253 MW güçle, ulusal kurulu gücün %9,5'ini oluşturmaktadır.



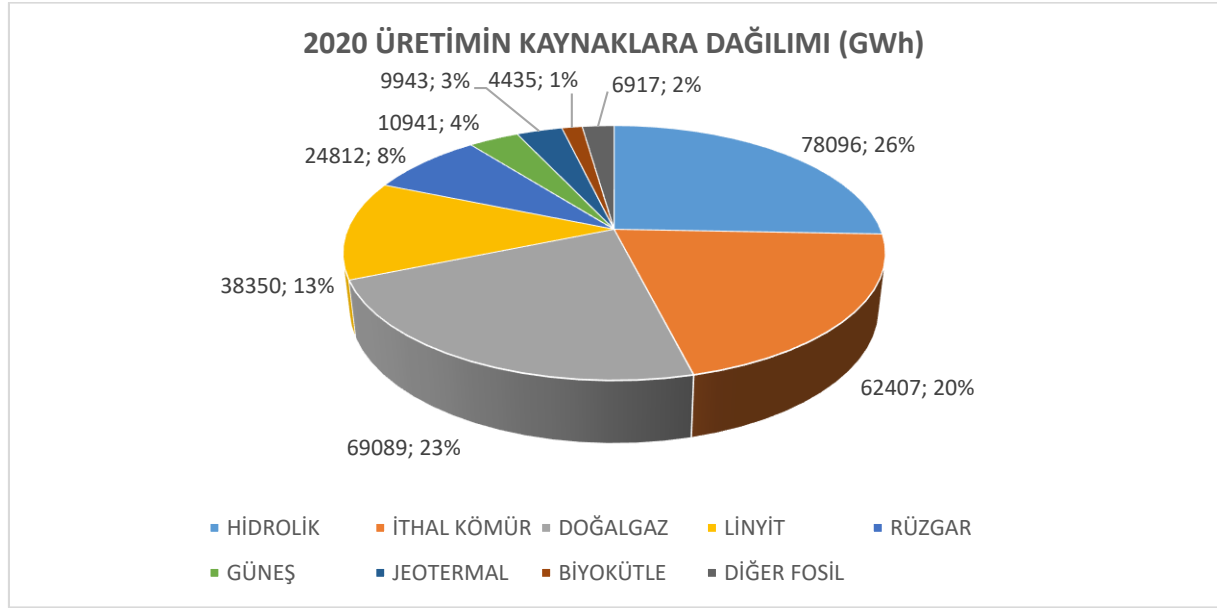
Şekil 3 Kaynaklara göre Türkiye Elektrik Kurulu Gücü



Şekil 4 Üretim kaynaklara göre dağılımı (2019)

2019 yılı sonu itibariyle 302 TWh elektrik üretiminin 21,7 TWh'lik bölümü rüzgâr santrallerinden karşılanmış olup, bu üretim toplam üretimin %7'sini oluşturmaktadır. 2019 yılına ait üretimin kaynaklara göre dağılımı Şekil 4'te gösterilmektedir.

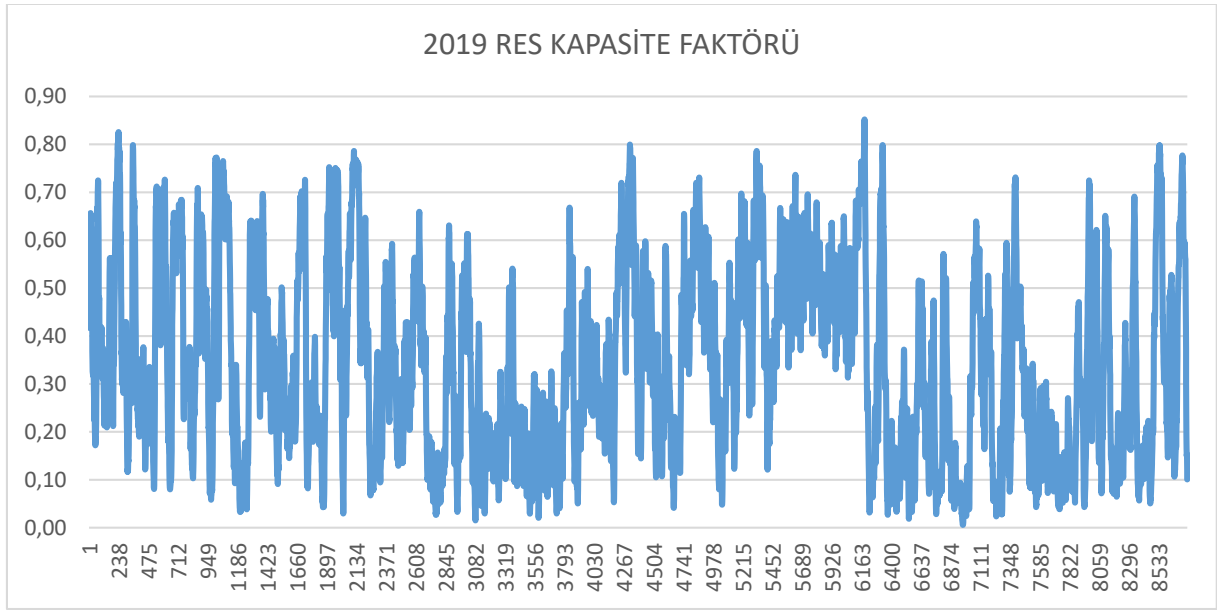
2020 yılı sonu itibariyle 304 TWh elektrik üretiminin 24,8 TWh'lik bölümü rüzgâr santrallerinden karşılanmış olup, bu üretim toplam üretimin %8'ini oluşturmaktadır. Ülke geneli toplam üretim hemen hemen aynı kalırken, rüzgâr santrallerinin üretiminin toplam üretimdeki payındaki %1'lik artış dikkat çekicidir. 2020 yılına ait üretimin kaynaklara göre dağılımı Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5 Üretimin kaynaklara göre dağılımı (2020)

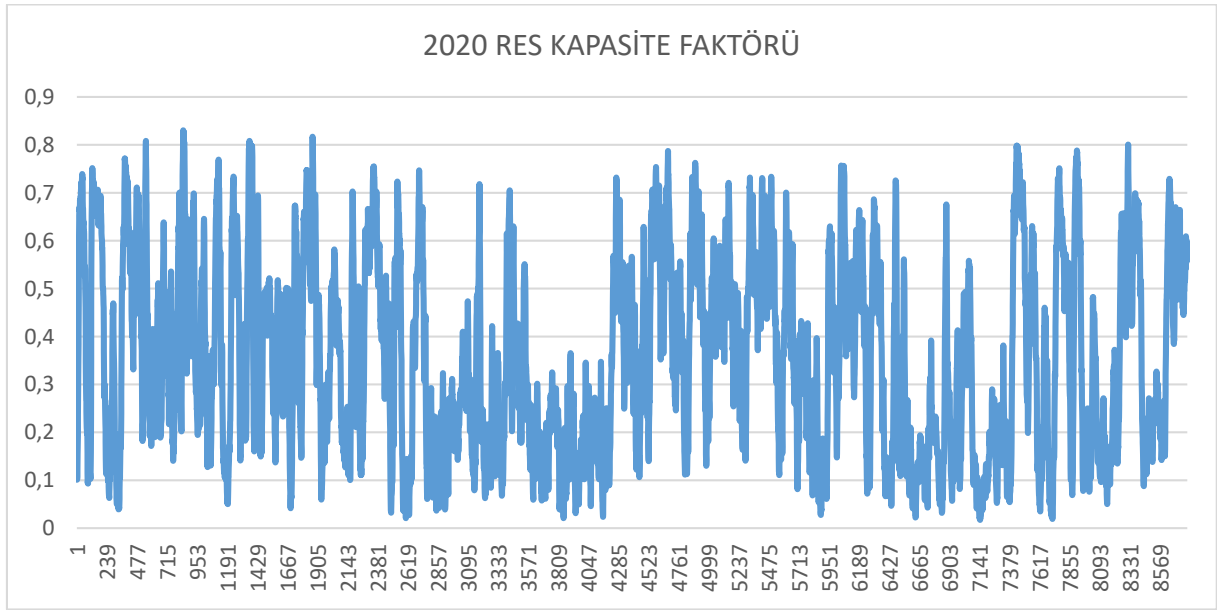
Yenilenebilir enerji kaynaklarının çalışma rejimleri oldukça farklılık göstermektedir. Akarsu tipi hidrolik santraller su rejimine bağımlı olarak çalışmaktadır. Barajlı hidrolik santraller ise su rejiminin yanı sıra, baraj hacimleri ve elektrik piyasasındaki fiyatlara göre çalışma rejimlerine karar vermektedirler. Güneş santralleri ışınlım ve bulutluluktan etkilenmektedir. Rüzgâr santralleri ise değişken rüzgâr rejimine göre belirli rüzgâr hızlarında çalışabilmektedir. Basit olarak ifade etmek gerekirse HES, RES, GES'lerin üretimlerini tahmin etmek için onlara bağlı su, rüzgâr ve güneşin tahmini gerekmektedir. Su rejimi kışın yağan kar ve bu karların erimesinden doğrudan etkilense bile tahmin edilmesi en kolay olanıdır. Türkiye'de bahar feyzanı olarak adlandırılan bu durum genelde Şubat-Mart aylarında Akdeniz bölgesinde başlamakta Mayıs-Haziran aylarında Doğu Karadeniz bölgesi ile bitmektedir. Güneş tahmininde sadece gündüz saatleri tahminin bir parçasıdır. RES ise gece ve gündüz her mevsimde farklı rejimlerde çalışabilmektedir. Rüzgâr Gücü İzleme ve Tahmin Merkezi ile 28 Aralık 2020 itibariyle 7901 MW gücündeki rüzgâr santrali için izleme ve tahmin yapılmaktadır. Enerji ticareti için 72 saate kadar tahmin yapılmaktadır. Sistem yönetimi içinse 6 saate kadar tahmin yapılmaktadır.

2019 yılı boyunca ulusal RES kapasite faktörü %0 ile %84 arasında değişkenlik göstermiştir. Ortalama ise %33,6'dır. RES kapasite faktörü Şekil 6'da gösterilmektedir.



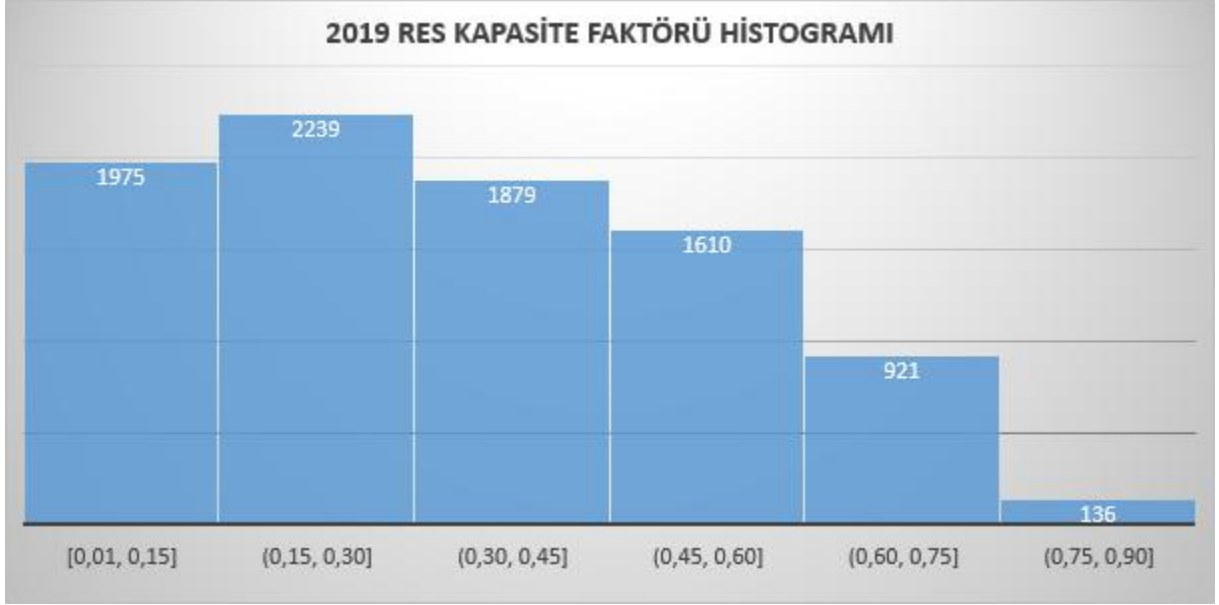
Şekil 6 RES kapasite faktörü (2019)

2020 yılı ulusal RES kapasite faktörü de benzer şekilde %0 ile %83 arasında değişmektedir. Ortalama da ise artış olmuş ve %34,2'ye yükselmiştir. RES kapasite faktörü Şekil 7'de gösterilmektedir.



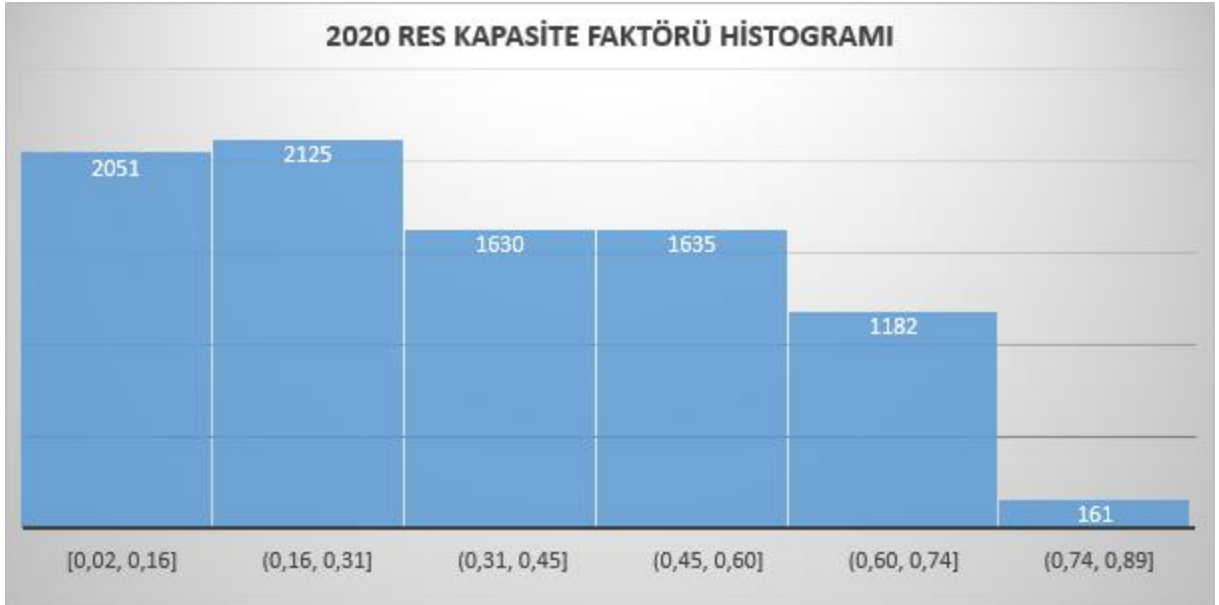
Şekil 7 RES kapasite faktörü (2020)

Şekil 8'de gösterilen 2019 yılı histogramı incelendiğinde ise yılın 1000 saatlik bölümünde RES'lerin %60 ve üzeri çalıştıkları görülmektedir.



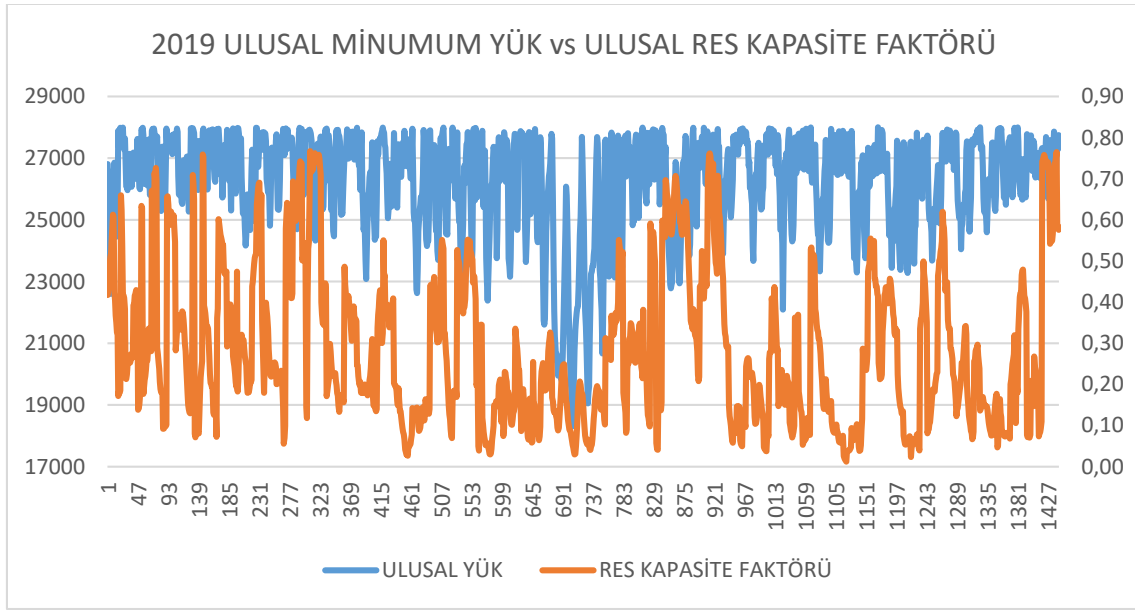
Şekil 8 RES kapasite faktörü histogramı (2019)

Şekil 9’da verilen histogramdan anlaşılabacağı üzere 2020 yılında RES üretimi için pik saatler artmış olup, 1300 saat üzerinde RES’lerin %60 ve üzeri çalıştıkları görülmektedir.



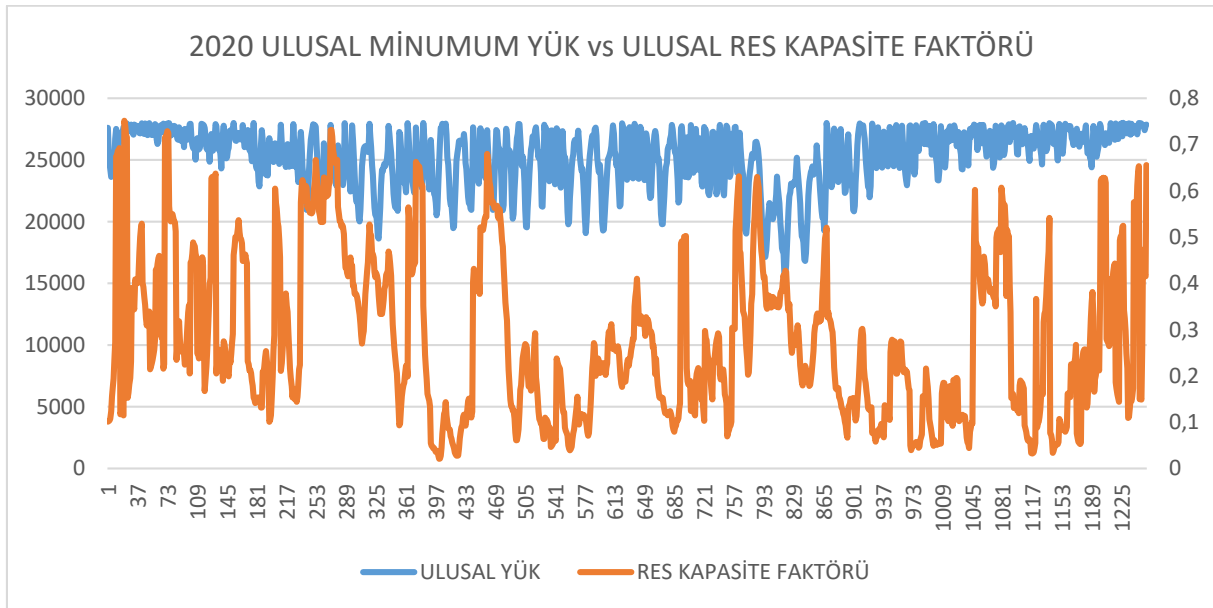
Şekil 9 RES kapasite faktörü histogramı (2020)

Sistem işletmeciliği açısından rüzgâr santrallerinin yükün yüksek olduğu saatlerde çalışması istenen bir durumdur. Ancak her zaman bu durum mümkün değildir. Yükün düşük olduğu saatlerde rüzgâr santrallerinin yoğun çalışması iletim sisteminde rüzgâr üretiminin iletimi noktasında kısıtlara neden olabilmektedir. Şekil 10’da ulusal yükün 28 GW’ın altına indiği saatlerdeki RES çalışma kapasite faktörleri gösterilmektedir. Minimum saatlerde RES’lerin zaman zaman %70 üzeri çalıştıkları görülmektedir.



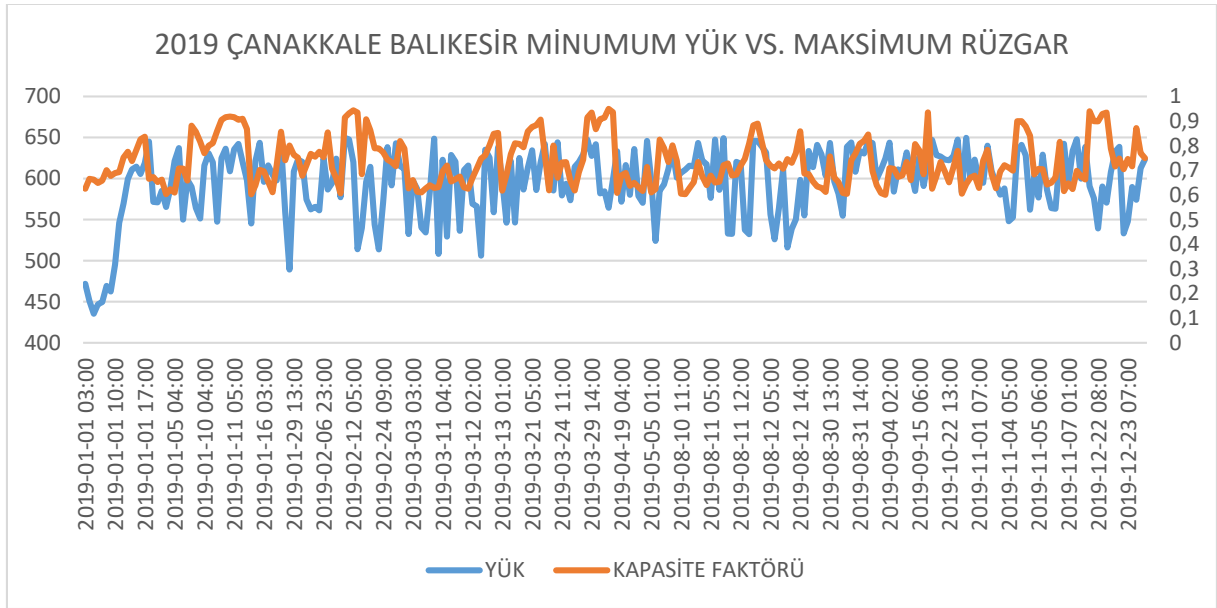
Şekil 10 Ulusal minimum yük ile RES kapasite faktörü karşılaştırılması (2019)

Şekil 11’de görüldüğü üzere 2020 yılında da benzer bir durum oluşarak, yükün minimum olduğu koşullarda RES’lerin %70 üzeri çalıştığı zaman dilimlerinin bulunduğu görülmektedir.



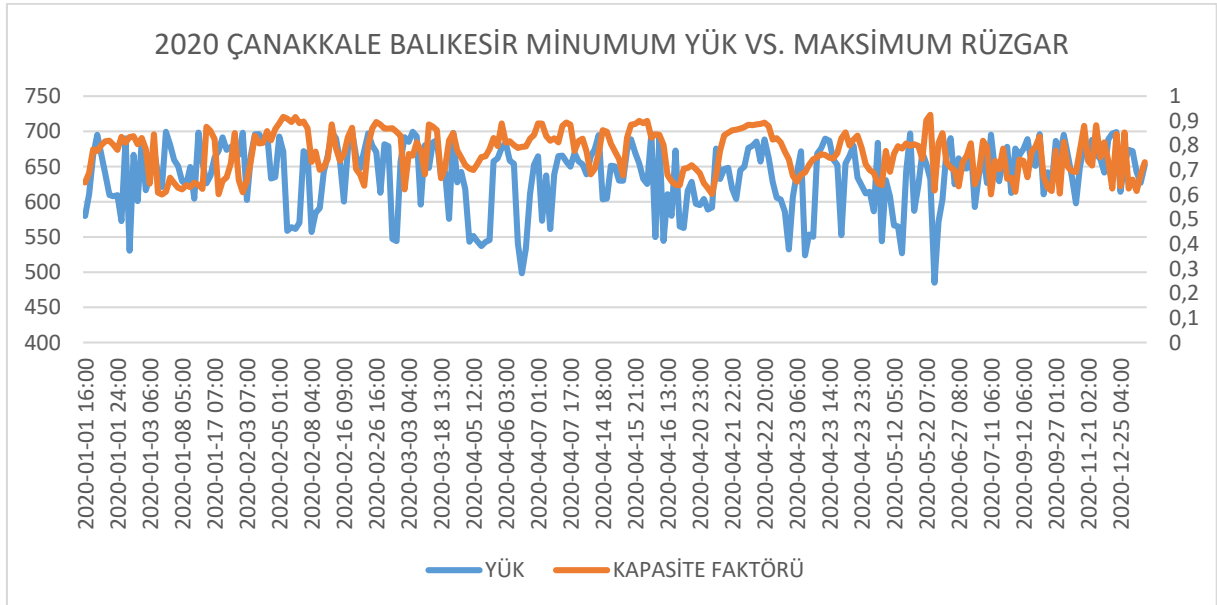
Şekil 11 Ulusal minimum yük ile RES kapasite faktörü karşılaştırılması (2020)

Ulusal ölçekteki minimum yük – maksimum RES olasılığı lokal düzeyde daha fazla olmaktadır. Batı Anadolu YTİM ile 2. Bölge Müdürlüğü’nün kesiştiği Balıkesir ve Çanakkale illerini kapsayan bölgede 2019 yılı boyunca yükün en düşük olduğu 1100 saatlik %12,5’luk zaman diliminde RES üretiminin %60’ı geçtiği 247 saat bulunmaktadır. Bu 247 saat boyunca ortalama yük 600 MW iken, RES üretimi 1000 MW’tır. Meydana gelen RES üretiminin, ilgili bölgedeki tüketim miktarını yaklaşık 800 MW geçtiği saatler bulunmaktadır. Üstelik RES kapasite faktörü %90’ı dahi geçebilmektedir. Çanakkale ve Balıkesir illerinin minimum ve yük maksimum rüzgâr grafiği Şekil 12’de gösterilmektedir.



Şekil 12 Çanakkale ve Balıkesir illerinde minimum yük ve maksimum rüzgar karşılaştırması (2019)

2020 yılı Balıkesir ve Çanakkale illerini kapsayan bölgede yükün en düşük olduğu 1100 saatte RES kapasite faktörünün %95'lere ulaştığı saatler bulunmaktadır. RES üretiminin %60'ı geçtiği ve yükün düşük olduğu 264 saat boyunca RES ortalama üretimi 1170 MW civarındayken ortalama yük 640 MW'tır. Çanakkale ve Balıkesir illerinin minimum yük ve maksimum rüzgar grafiği Şekil 13'te gösterilmektedir.



Şekil 13 Çanakkale ve Balıkesir illerinde minimum yük ve maksimum rüzgar karşılaştırması (2020)

2019 ve 2020 yılları kıyaslandığında gerek ulusal düzeyde gerek Çanakkale-Balıkesir özelinde RES'lerin daha yüksek kapasite faktörüyle çalışmaya başladığı, minimum yük saatlerindeki maksimum rüzgâr üretimine bağlı riskli saatlerin arttığı görülmektedir. Ancak 2020 yılının

bahar aylarında Covid-19 pandemisine bağılı olarak tüketimin ve saatlik yükün düşmesi de bunda etkili olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında temel olarak 2 bakış açısıyla araştırma yapılmıştır. Bunlardan biri 400/154 kV Faz Kaydırıcı Ototransformatörlerin incelenmesi iken, diğeri 400 kV iletim hatlarında kullanılabilecek FKT'lerin araştırılmasıdır. Bu doğrultuda planlama çalışmalarında kullanılan 5 farklı veri üzerinde çeşitli analizler yapılmıştır. 400/154 kV FKT'nin konum ve açısını elde etmek için %80 rüzgâr kapasite faktörüyle ilkbahar minimum yük koşullarının yansıtıldığı model kullanılmıştır. 5 yıl sonrasının vizyonunu yansıtan modelimiz şu içeriklere sahiptir:

- Planlanan 400 kV ve 154 kV hat ve transformatör merkezleri
- Fiderleri donatılı rezerv 400/154 kV ototransformatörler
- Planlanan yeni RES projeleri
- Planlanan RES güç artışları
- 5 yıl sonraki yük tahmini
- Planlanan lisanssız GES projeleri

Tablo 1'de detayları verilen santraller incelendiğinde Çanakkale İli'nin Anadolu'da yer alan kısmındaki RES kurulu gücünün 18.03.2021 itibariyle 743 MW olduğu, yeni RES projeleri ve güç artışları sonrasında nihai gücün 1523 MW'a ulaşacağı görülmektedir. Çanakkale İli rüzgâr kurulu gücünü 2 katına çıkaracak potansiyele sahiptir.

Tablo 1 Çanakkale İlinin Bir Bölümünde Bulunan Rüzgâr Santrallerinde Gerçekleşecek Tahmini Kapasite Artışı

ADI	İŞLETMEDEKİ GÜÇ (MW)	NİHAİ GÜÇ
AYES YENİKÖY RES	3	15
BİGA RES	60	60
BORES	10,2	10,2
ÇAMSEKİ RES	63,1	63,1
ENERJİSA ÇANAKKALE RES	29,9	29,9
GAZİ-9 RES	43,8	51
GELİBOLU RES AYVACIK	8,75	8,75
G RES	5	5
GÜLPINAR RES	25	160
HASANOBA RES	51	76

İNTEPE RES	55,7	55,7
KOCALAR RES	27	51
KORU RES	50	50
MASLAKTEPE RES	20	68,4
SARES RES	27,5	27,5
SAROS RES	107,3	138
SEYİT ONBAŞI RES	9	9
ÜÇPINAR RES	99	108,6
YENİKÖY RES	48	48
ILGARDERE RES	0	45
GÜNEYLİ RES	0	32
GELİBOLU RES	0	30
KEREMRES RES	0	3,8
YEL DEĞİRMENİ RES	0	5
GÖNEN RES	0	9,9
KÖSELER RES	0	71,4
SELİN 4 RES	0	0,8
AYÇA RES	0	40
ÇANAKKALE YEKA RES	0	250
TOPLAM	743,25	1523,05

400 kV iletim hatlarında FKT gereksinimini araştırmak için 10 yıl sonrasının şebeke planı kullanılmıştır. Bu planda en kötü senaryoyu uygulayabilmek amacıyla yüklü şebeke koşullarının kullanılması tercih edilmiştir. Güney Marmara bölgesinde gözlemlenen aşırı yüklenmeleri hafifletebilecek optimal FKT konum ve açısını elde edebilmek amacıyla çeşitli senaryolar değerlendirilmiştir.

5.2. Sezgi-Üstü Algoritmalar

Parçacık Sürü Optimizasyonu

Sinirbilim, bilişsel psikoloji, sosyal etoloji ve davranış bilimleri alanındaki çalışmalardan esinlenerek, sürü zekâsı kavramı, 1989 yılında tanıtılmıştır. Sürü zekası yaklaşımı genel olarak bilgi işlem ve yapay zeka alanındaki problemlerin optimizasyon mantığıyla çözülebileceği durumlarda kullanılmaktadır. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) sürü tabanlı bir algoritmadır. Bu algoritma çalışması sırasında türev bilgisine ihtiyaç duymamakta ve hem kendi en iyi konumlarını hem de sürüdeki en iyi konum değerlerini kullanabilmektedir.

PSO algoritması, global arama özelliğine sahip ve kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş, evrimsel hesaplama tekniğine dayalı optimizasyon algoritmasıdır (Eberhart ve Kennedy, 1995). Temel PSO, balık yetiştirme ve kuş sürüleri gibi sürü üzerine yapılan araştırmalardan geliştirilmiştir.

PSO algoritması, kuş sürüleri ve balık yetiştirme gibi gruplarında veya sürülerinde herhangi bir lideri olmayan hayvan toplumlarının davranışlarından esinlenilerek geliştirilen yöntemdir. Tipik olarak, lideri olmayan bir hayvan sürüsü rastgele yiyecek bulamaz, gruptaki yiyeceğe en yakın bireyi takip ederek yiyeceğe ulaşırlar. Yiyeceğe daha yakın olan birey, onu sürüdeki diğer bireylere bildirir ve böylece diğerleri de yiyeceğe erişebilir. Bu, en iyi koşullar veya bir besin kaynağı keşfedilene kadar tekrar tekrar gerçekleşmektedir. En uygun çözümü bulma aşamasında PSO algoritmasının çalışma mantığı da bu şekildedir. Parçacık sürüsü optimizasyonu, parçacığın potansiyel bir çözümü temsil ettiği bir parçacık kümesinden oluşmaktadır.

PSO algoritması, başlangıçta her biri bir konum ve hız ile ilişkili olan rastgele parçacıklarla oluşturulmuş bir popülasyon ile çalışmaya başlar. Hızlar, her bir parçacığın ve komşularının arama uzayında uçarken tarihsel davranışına göre ayarlanır. Pozisyonlar, mevcut pozisyona ve bir sonraki adımdaki hızlara göre güncellenir. Bu nedenle, parçacıklar, arama süreci rotası üzerinde daha iyi olana doğru uçuş eğilimindedir.

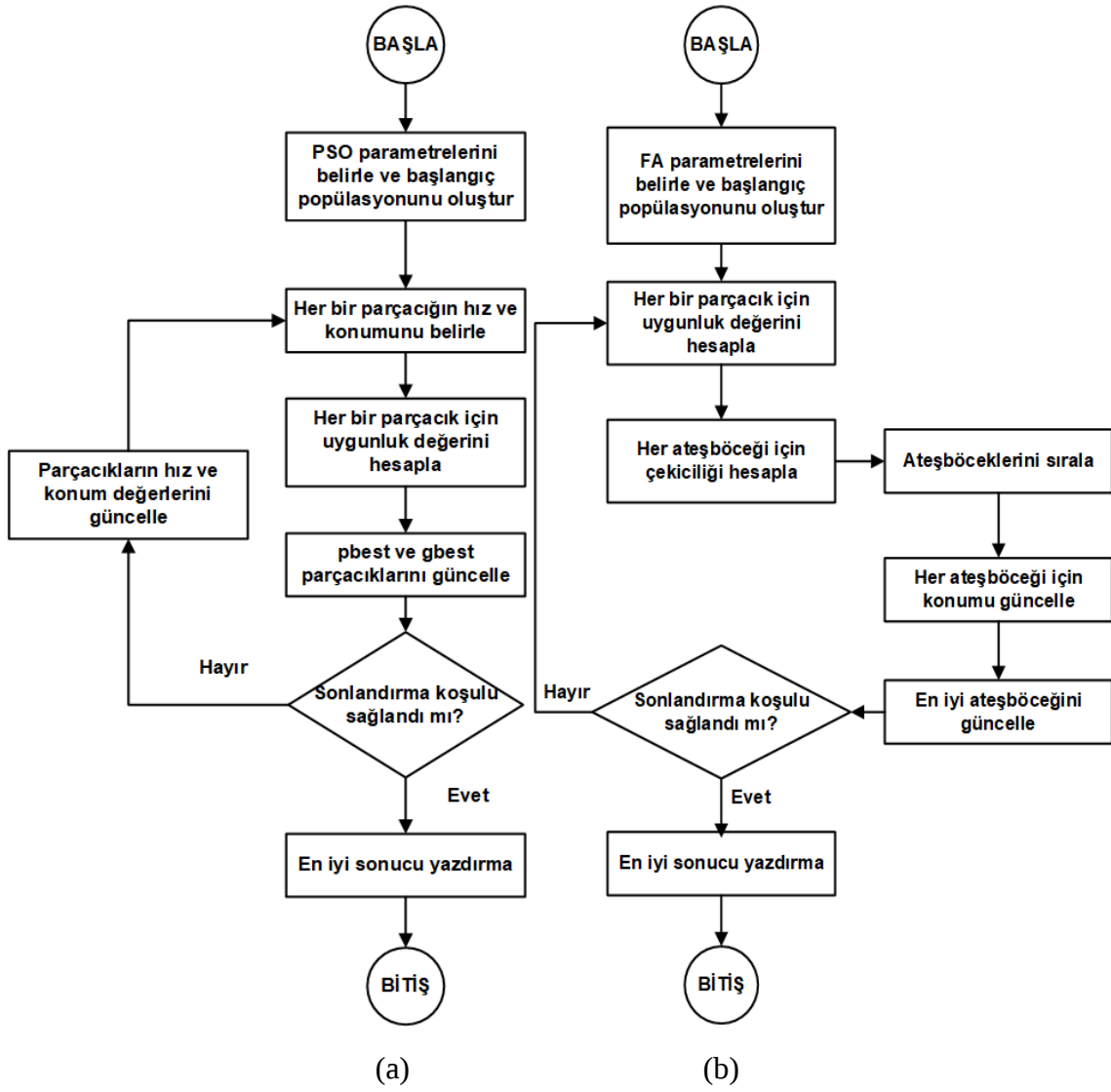
PSO algoritması ilk olarak çözüm uzayına rastgele dağıtılmış parçacıklar ile çalışmaya başlar. Bu parçacıklar algoritmanın çalışma sırasında kendi elde ettiği en iyi değer 'pbest' ve sürüdeki en iyi çözüm olan 'gbest' değerlerine göre hız ve konum güncellemesi yaparlar. Bu şekilde çözüm uzayında dolaşarak en iyi çözümü ararlar. PSO algoritmasında parçacıkların arama uzayındaki hareketini gösteren denklemler şu şekildedir:

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + c_1 * r_1 * (p_{ibest} - x_i(t)) + c_2 * r_2 * (g_{best} - x_i(t)) \quad (6.1)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (6.2)$$

Denklem (1) parçacığın hız güncellemesini sağlamaktadır; Denklem (2) güncellenen hız değerine göre parçacığın arama uzayında hareket etmesini sağlayan eşitliktir. t ve i iterasyon sayısı ve i anki parçacığın indis numarasıdır. x_i parçacığın konumunu ifade eder. c_1 ve c_2 hızlandırma katsayılarıdır ($[0, 2]$ aralığında seçilirler) ve PSO'nun yakınsama oranını etkileyen bileşenlerdir. r_1 ve r_2 rastgele sayılardır ($[0, 1]$ aralığında seçilirler).

Algoritmanın çalışma aşamalarını gösteren akış diyagramı Şekil 14 a' da sunulmuştur.



Şekil 14 (a) Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasına ait akış diyagramı, (b) Ateşböceği algoritmasına ait akış diyagramı

Ateşböceği Algoritması

Ateşböceği algoritması (Yang, 2008), doğadaki ateşböceklerinin birbirleriyle haberleşmeleri ve doğada yaşamlarını devam ettirebilmeleri için ortaya koydukları davranışlardan esinlenerek geliştirilmiş bir sürü tabanlı optimizasyon algoritmasıdır. Ateşböceği algoritması (Firefly Algorithm) çalışma sırasında az parametre kullanımı, problemlere uyarlanmasının kolay olması ve algoritma adımlarının anlaşılabilir olması nedeniyle birçok uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Algoritmanın çalışma mantığında 3 disiplin bulunmaktadır:

- Ateşböcekleri unisex olarak kabul edilmektedir. Cinsiyet ayrımı yapılmaksızın birbirlerini etkiledikleri varsayılmaktadır.
- Ateşböceklerinin etkinlik değeri parlaklık derecesine göre belirlenmektedir. Ateşböceğinin çekicilik değerleri de etkinlik değerine göre değişmektedir. Bu nedenle, en parlak olan ateşböceği diğer ateşböceklerini kendisine doğru çekmektedir. Eğer bir

ateşböceğinin çevresinde, kendisinden daha parlak bir ateşböceği yoksa bu ateşböceği rastgele bir şekilde hareket etmektedir.

- Parlaklık değeri düşük olan bir ateşböceği, parlaklığı daha yüksek olan diğer ateşböceğine doğru hareket eder. Algoritmanın çalışması sırasında her bir ateşböceğinin etkinlik faktörü ve parlaklığı, o andaki problemin uygunluk fonksiyonuna göre belirlenmektedir.

FA yönteminin çalışma adımlarında 2 önemli parametre bulunmaktadır: ışık yoğunluğu (I) ve çekicilik (β). Ateşböceklerinin çekiciliği, diğer ateşböceğine olan mesafelerine göre değişir. Bu nedenle ilk olarak iki ateş böceği arasındaki mesafenin bilinmesi gerekmektedir. x_i ve x_j değişkenlerinin i . ve j . ateşböceklerinin konumları olduğunu farzederek, iki ateşböceği arasındaki mesafe şu şekilde hesaplanır:

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| \quad (6.3)$$

Ateşböceklerine ait ışık yoğunluğu fonksiyonu şu şekildedir:

$$r_{ij} = I_0 e^{-\gamma r} \quad (6.4)$$

Burada I_0 başlangıç ışık yoğunluğunu, γ ışık soğurma katsayısını, r iki ateşböceği arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. İdealleştirilmiş kurallardan, simülasyonumuzda varsaydığımız ateşböceğinin çekiciliği ışık yoğunluğu I ile orantılıdır. Dolayısıyla ateşböceğinin ışık çekme katsayısı β ışık yoğunluğu katsayısına benzer şekilde tanımlanır. Ateşböcekleri arasındaki mesafe bilindiğine göre, ateşböceğinin çekiciliği (β) şu şekilde hesaplanır:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (6.5)$$

buradaki β_0 , ($r = 0$)'daki maksimum çekicilik parametresi ve γ ışık soğurma katsayısıdır. Bu parametre ateşböceğine ait olan çekicilik değerinin değişimini göstermektedir. Bu parametrenin alacağı değere göre algoritmanın yakınsama hızı etkilenmektedir. Işığın soğurma katsayısı için kullanılan parametre değeri sıfır ile sonsuz arasında değişmektedir. Bu katsayı sıfır olduğunda sabit bir çekicilik derecesi ile çalışılmakta, sonsuz olduğunda ise çekicilik derecesinin olmadığı bir ortamda çalışılmaktadır.

Arama uzayındaki ateşböcekleri daha çekici olan ateşböceğine doğru hareket ederler. i . ateşböceğinin j . ateşböceğine göre hareketi şu şekilde olmaktadır:

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^2_{ij}}(x_j - x_i) + \alpha(rnd - \frac{1}{2}) \quad (6.6)$$

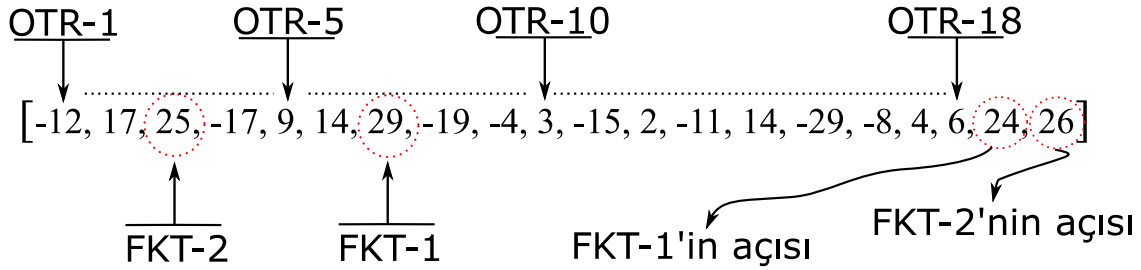
rnd random üretilen bir reel değeri ifade eder ($[0,1]$ aralığında). α rastgele seçim parametresidir.

Bu eşitlik üç kısımda incelenebilir. İlk kısım; i . ateş böceğinin mevcut pozisyonunu ifade etmektedir. İkinci kısım; ateşböceğinin çekiciliğini göstermektedir. Son kısım ise rastgeleliği göstermektedir. Üçüncü kısımdaki rastgelelik, o an ortamda daha parlak bir böcek yok ise o adımdaki ateşböceğinin random olarak hareket etmesini sağlamaktadır.

Ateşböceği algoritmasına ait çalışma aşamalarını gösteren akış diyagramı Şekil 14 b'de gösterilmiştir.

Sezgi-üstü algoritmaların kullanacağı birey yapısı

Sezgi-üstü algoritmaların en uygun FKT lokasyonunu ve en uygun açığı elde etmesi amaçlanmaktadır. Ancak analizlere başlamadan önce hedef bölge belirlenmeli, optimize edilecek bölgede FKT yerleştirilebilecek hedef transformatör merkezleri seçilmeli ve uygulanabilecek FKT sayısı kararlaştırılmalıdır. Ön hazırlıklar yapıldıktan sonra sezgi-üstü algoritmaların bu problemle baş edebilmesi için kullanılacak birey kurgulanmalıdır. Birey yapısının neye benzediğini anlatabilmek amacıyla Batı Anadolu Bölgesinde gerçekleştirilen 400/154 kV FKT gereksinim araştırmasında kullanılan birey yapısı örneklendirilmiştir.



Şekil 15 Sezgi-üstü algoritmalar için oluşturulan birey yapısı

Batı Anadolu Bölgesinde FKT yerleşimi mevcut durumda işletilen ototransformatörler yerine uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. İlgili bölgede toplam 18 farklı ototransformatör veya bank (iki ototransformatörün birlikte işletildiği teçhizat) yerine eş zamanlı olarak 2 FKT yerleşimi öngörülmüştür. Yani sezgi-üstü algoritmalar her yinelemede OTR veya banklardan 2 tanesi yerine FKT yerleştirip açı ayarı yaparak sistemin kısıt analizi performansını iyileştirmeye çalışacaktır. FKT'lerin açısı +32 ile -32 derece arasında değişecek şekilde kurgulanmıştır.

Şekil 15'te tasarlanan örnek bir birey yapısı gösterilmektedir. Liste içerisinde ilk 18'i OTR veya bankları ve son 2'si FKT açılarını temsil eden 20 veri bulunmaktadır. Verilerin tamamı +32 ile -32 arasında değişmektedir. Liste içerisinde bulunan ilk 18 veriden en büyük değere sahip iki OTR veya bank yerine FKT yerleştirilerek açı ayarları listenin son iki hanesinde belirtilen verilere göre gerçekleştirilmektedir. Örnek birey yapımızda listenin 7. sırasında bulunan OTR yerine 1. FKT yerleştirilerek açısı 24 dereceye ayarlanmaktadır. Benzer şekilde listenin 3. sırasında yer alan 25 sayısı en büyük 2. sayı olduğu için 2. FKT bu sıradaki OTR yerine eklenerek açısı 26 yapılmaktadır. Oluşturulan bu senaryo kısıt analizinden geçirilerek sistemin N-1 performansında herhangi bir iyileşme olup olmadığı test edilmektedir. Yinelemeler tamamlandığında en iyi sonucun elde edilmesi amaçlanmaktadır. Burada eklenen FKT'lerin gücü çıkarılan OTR'lerin gücüyle aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Örneğin yerine FKT eklenecek bir bankın gücü 500 MVA ise ilgili FKT'nin de gücü 500 MVA yapılmaktadır. Sezgi-üstü algoritmalar liste içerisinde bulunan ve OTR konumlarını temsil eden değişkenlerin pozisyonlarını güncelleyerek daha iyi işletme koşullarının oluşmasını sağlayacaktır.

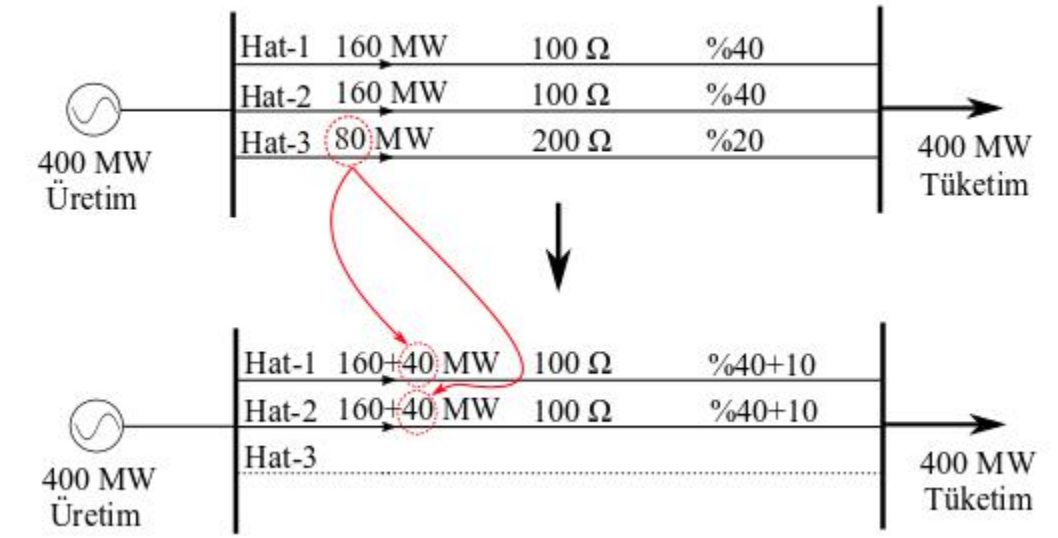
Burada bahsedilen kurgunun benzeri 400 kV iletim hatlarında yürütülen FKT araştırmaları kapsamında da kullanılmıştır.

5.3. Matematiksel Yöntem

Dağılım faktörlerine dayalı lineer kısıt analizi

Güç sisteminde topolojik bir değişim söz konusu değilse bir teçhizatın servis harici olması başka bir ekipman üzerinde benzer etkiyi bırakır. Yine herhangi bir barada artan veya azalan üretim seviyesi ilgili ekipmanlar üzerindeki güç akışlarında belirli bir katsayıya dayalı olarak değişikliklere neden olur. Örnek olarak Şekil 16'da verilen basit güç sistemini inceleyelim. Bu sistemde hatların kayıpsız olduğunu varsayalım ve reaktif güç akışlarını ihmal edelim. Üretilen güç tüketim noktasına ulaşırken empedansı küçük olan yolları daha yüksek oranda tercih eder. Sistemimizde empedansı 100 Ω olan enerji iletim hatları (hat-1 ve hat-2) üretilen enerjinin %40'ını taşıırken 200 Ω olan hat (hat-3) %20'sini taşımaktadır. Bu sistemde herhangi bir nedenle hat-3'ü kaybedersek bu hat üzerinden akan güç miktarı diğer hatlara dağılacaktır. Hat-1 ve hat-2'nin aynı empedansa sahip olduğunu bildiğimize göre servis harici olan hat-3'ün üzerinden akan 80 MW'lık gücün eşit şekilde diğer hatlara dağılacığını öngörebiliriz.

Basit güç sistemimizde üretim ve tüketim miktarlarının 400 MW'a yükseldiğini varsayalım. Bu durumda güç akışları hat-1 ve hat-2'de 200 MW'a ve hat-3'te 100 MW'a yükselecektir. Yüklenme koşullarının bu şekilde gerçekleştiği bir sistemde hat-3'ün servis harici olması senaryosu hat-1 ve hat-2 üzerine kayan güç miktarını değiştirecektir ancak etkilenme oranlarını değiştirmeyecektir. Çünkü hat-3 üzerinden akan güç miktarı yine hat-1 ve hat-2'ye eşit şekilde dağılacaktır. O halde burada hat-3'ün üzerinden akan güç miktarı ne olursa olsun servis harici olması durumunda hat-1 ve hat-2'yi 0.5 oranında etkileyecektir. Başka bir ifadeyle hat-3 üzerinden akan gücün %50'si hat-1'e ve %50'si hat-2'ye kayacaktır.



Şekil 16 Basit bir sistemde güç kayma örneği

Basit güç sistemimizde kayma miktarlarını yansıtan dağılım katsayılarını elde etmek basittir ancak gerçek bir güç sistemi oldukça karmaşık ağ yapısı nedeniyle bu oranları bize kolaylıkla sunmaz. Bu nedenle çalışmamız kapsamında hangi ekipmanın hangi teçhizat üzerinde ne kadar etkili olduğunu yansıtan bu dağılım katsayılarını elde edebilmek için PSS/E güç sistemi analiz programından faydalanılmıştır.

Programdan çekilen dağılım faktörlerinde her bir sütun, karşılık gelen kısıtın diğer ekipmanlar üzerinde oluşturacağı yüklenme miktarlarını yansıtan katsayıları içermektedir. Programın oluşturduğu bu katsayılar, doğru akım güç akışı eşitlikleri kullanılarak kısıt öncesi ve sonrasında diğer teçhizatlar üzerinde oluşan değişim oranlarıyla elde edilmektedir. Eşitlik 6.7’de PSS/E programının dağılım katsayılarını elde ettiği yaklaşım verilmiştir [52].

$$L_{hat1,hat3} = (P_{yeni-hat1} - P_{hat1})/P_{hat3}$$

$$P_{yeni-hat1} = P_{hat1} + P_{hat3} * L_{hat1,hat3} \quad (6.7)$$

Denklem 6.7’de verilen $L_{hat1,hat3}$ ifadesi hat-3’te meydana gelen bir değişikliğin hat-1’i etkileme oranını veren dağılım katsayısını, $P_{yeni-hat1}$ hat-3’te oluşan değişimden sonra hat-1’de gerçekleşen yeni güç akışını, P_{hat1} temel durumda hat-1 üzerinden akan güç akışını ve P_{hat3} hat-3’te meydana gelen değişimi temsil etmektedir. Bu mantıkla her bir kısıtın diğer ekipmanlar üzerinde bırakacağı etkiyi temsil eden dağılım katsayıları elde edilir.

$$L = \begin{bmatrix} -1.0000 & 0.6667 & 0.5000 \\ 0.6667 & -1.0000 & 0.5000 \\ 0.3333 & 0.3333 & -1.0000 \end{bmatrix}$$

Şekil 17 Dağılım faktörü örneği

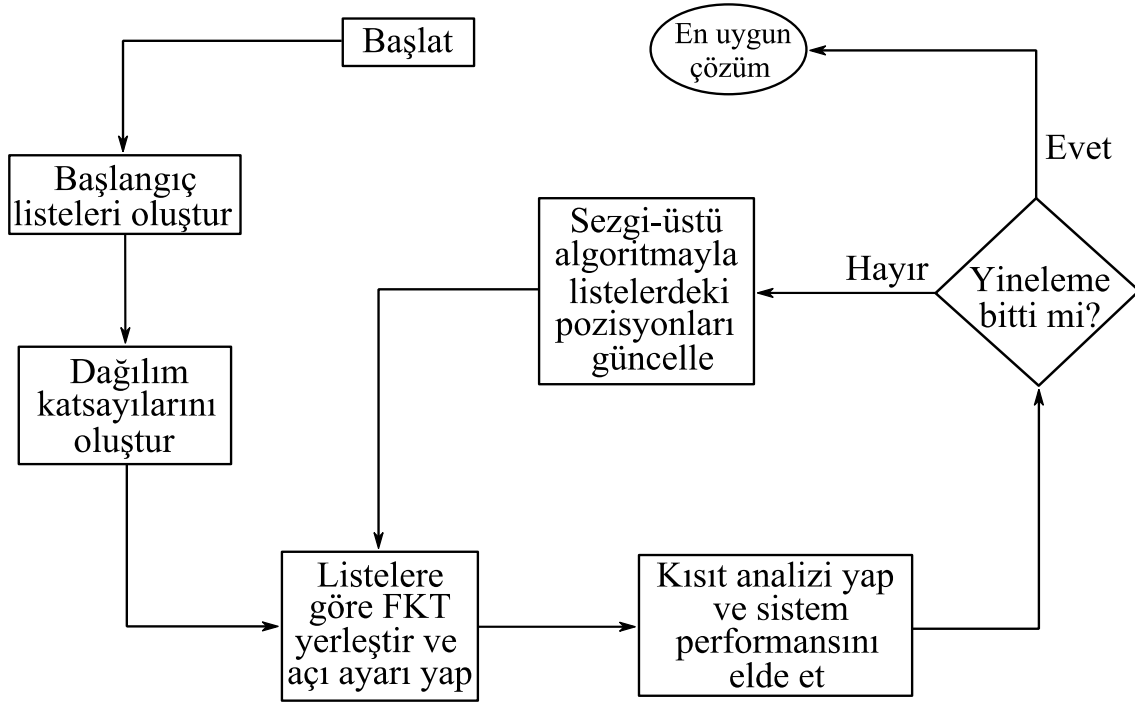
Şekil 16’da verilen basit sistemin dağılım faktörleri Denklem 6.7’de verilen eşitlikler ile Şekil 17’de sunulduğu gibi elde edilir. Başlangıçta oluşturulan bu katsayılarla kısıt analizi önemli miktarda hızlandırılmış olur. Yerleştirilen FKT’lerin açı ayarları yapıldığında sistemdeki temel durum güç akışları değişse bile katsayılar değişmeyecektir. Dolayısıyla kısıt analizi için gerekli olan tek şey temel durum güç akış bilgilerini çekerek dağılım katsayılarını kullanmaktır.

Kullanılan algoritma

Popülasyon tabanlı sezgi-üstü algoritmaların her bireyi, yinelemeler boyunca amaç fonksiyonu maliyetini daha iyi bir noktaya taşımaya çalışır. Örneğin algoritmanın nüfusu 30 ve yineleme sayısı 500 seçilirse, 30 birey 500 defa pozisyon güncellemeye çalışarak edinilen amaca ulaşmaya çalışmaktadır.

Şekil 18’de verilen algoritmada problemi çözmek için kullandığımız yöntem sunulmaktadır. Birey yapısı belirlendikten sonra (hedef lokasyonlar belirlenerek birey yapısının içeriği oluşturulduktan sonra) -32 ile +32 arasında değişen rastgele sayılarla başlangıç popülasyonu oluşturulur. Açı ayarları yapıldıkça güç sistemindeki güç akışları farklı olsa dahi değişmeyecek olan kesinti dağılım katsayıları belirlenir. Bu katsayılar yinelemeler boyunca her kısıt analizinde başvurulacak temel bir bilgidir. Oluşturulan rastgele listelere göre bireylerin adres gösterdiği lokasyonlara FKT yerleşimi ve bunların açı ayarları yapılır. Bireylerin performansları değerlendirildikten sonra sistem durumunun başlangıç koşullarına getirilmesi unutulmamalıdır. Oluşturulan yeni güç akışlarına göre sistemin kısıt analizi gerçekleştirilerek nüfusu oluşturan bireylerin performansları değerlendirilir. Elde edilen veriler ışığında, kullanılan sezgi-üstü algoritmanın özelliklerine göre bireylerin hız ve pozisyon bilgileri güncellenir. İçeriği değişen bireylere dayalı olarak yeni lokasyonlara FKT yerleştirilir ve açı

ayar yapılır. Daha sonra yeni pozisyon ve açısı ayarlarının performansı değerlendirilir. Bu iteratif süreç kullanıcı tarafından girilen yineleme sayısı tamamlanana kadar devam eder.



Şekil 18 Problemin çözümü için tasarlanan algoritma

Amaç fonksiyonu

Amacımız rüzgâr santrallerinin yoğunlaştığı Batı Anadolu Bölgesinde kısıt durumunda özellikle 154 kV gerilim seviyesinde meydana gelen aşırı yüklenmeleri ortadan kaldırmak veya hafifletmektir. Tabiki kısıt durumunda sistem güvenliğini sürdürmek için yapılacak olan açısı ayarlarının temel durumdaki aşırı yüklenmeleri de ortadan kaldırması gerekir. Anlaşıldığı üzere problemimiz güç sistemini termal sınırlar dahilinde işletmeye yönelik FKT lokasyonu ve açısının belirleneceği tek amaçlı bir optimizasyon problemidir.

$$\text{Min.} \Rightarrow A_y \quad (6.8)$$

Denklem 6.8’de sistemin hem temel durumda hem de N-1 durumunda aşırı yüklenme durumunu yansıtan A_y değişkeninin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Sezgi-üstü algoritmalar A_y ’yi minimize ederek sistem güvenliğini artıracak FKT lokasyonu ve açısını elde etmeye çalışmaktadır.

$$A_y = T_{ay} + K_{ay} \quad (6.9)$$

Denklem 6.9’da A_y değişkeninin içeriği sunulmaktadır. T_{ay} , temel durumda sistemde meydana gelen aşırı yüklenmeleri ve K_{ay} , iletim hatları, ototransformatör ve generatörlerde oluşan kısıtların neden olduğu aşırı yüklenmeleri temsil etmektedir.

$$T_{ay} = \left(\sum_{i=1}^N \frac{a_i}{n} \right)^2 \quad (6.10)$$

$$K_{ay} = (\sum_{c:1}^{KS} \sum_{i:1}^N \frac{a_{ci}^y}{n})^2 \quad (6.11)$$

Denklem 6.10 ve 6.11’de amaç fonksiyonunu oluşturan A_y değişkeninin sahip olduğu bileşenlerin içerikleri verilmiştir. Bu eşitliklerde belirtilen a_i^y i. teçhizatın temel durum yüzdesel yüklenme miktarını ve a_{ci}^y c. kısıtta i. ekipman üzerinde oluşan yüzdesel yüklenme miktarını temsil etmektedir. Kullanılan yüzdesel yüklenmeler 154 kV gerilim seviyesi perspektifinden değerlendirilmiştir. Başka bir ifadeyle kısıt analizinde izlenen teçhizat 154 kV gerilim seviyesinde bulunan teçhizattır. Yüzdesel yüklenmeden kastımız ise iletim hattı veya ototransformatörlerden akan güç miktarının ilgili teçhizatların aşırı yüklenme nedeniyle servis harici edileceği veya termal sınırın aşıldığı limit değerin oranıdır. Burada temel durum ve kısıt durumunda kullanılan referanslar farklı seçilmiştir. Temel durumda iletim sistemi operatörleri iletim hatları veya ototransformatörleri termal sınırın (hatların bahar yükü taşıma kapasiteleri) üzerinde işletmekten kaçınır. Ancak N-1 durumunda asıl dikkat edilen nokta termal sınırın geçilip geçilmediği değil, aşırı akımdan servis harici edilip edilmeyeceğidir (kış yükü taşıma kapasitesi). Kısıt durumunda aşırı yüklenen teçhizat servis harici olmazsa ilgili ekipmanın yükünü termal limitlerin altına çekecek aksiyonlar arıza sonrası risk yönetimi kapsamında alınmaktadır. Dolayısıyla kısıt durumunda kısa süreliğine de olsa hatların termal sınırların üzerinde yüklenmesine müsaade edilir. Başka bir ifadeyle kısıt durumunda bir iletim hattı %100 yükleniyorsa aşırı akım röleleri vasıtasıyla servis harici edilmektedir ve bu senaryo engellenmelidir. Temel durumda ise bahsedilen %100 yüklenme ekipmanların servis harici olma sınırı değil termal yüklenme sınırındır. Örneğin, 477 MCM bir iletim hattı için termal sınır 132 MVA iken aşırı akımdan açma sınırı 180 MVA’dır.

Gerek temel durumda gerek N-1 durumunda meydana gelen aşırı yüklenmelerin kısıt performansındaki etkileri kademelendirilmiştir. Temel durumda termal sınıra göre %90’ın üzerinde yüklenen bir teçhizat varsa bu durum maliyet fonksiyonuna yansıtılmaktadır. Temel durum yüklenme miktarı %90 ile %92 arasındaysa yüzdesel yüklenme miktarının 10’a bölümünün karesi maliyete eklenmektedir. Eğer temel durumda %92 üzerinde bir yüklenme söz konusu ise yüzdesel yüklenme miktarının iki katının 10’a bölümü karesi alınarak maliyete eklenmektedir. Dolayısıyla ikinci durumda yüklenme miktarının maliyet fonksiyonunda gösterdiği etki yüksek olmaktadır. Kısıt durumu için hazırlanan senaryoda yüzdeler dilimlere 4 kademeye ayrılmıştır. Özellikle N-1 durumunda %97 üzerinde yüklenen bir teçhizat bulunuyorsa bu yüklenme miktarının 4 katı 10’a bölünerek karesi alınıp maliyet fonksiyonuna eklenmektedir.

Sezgi-üstü algoritmalar amaç fonksiyonunu minimize etmek için kısıt analizi yapılan bölgedeki yüklenmelerin tamamını %90’ın altına çekmeye çalışmaktadır. Sadece FKT’nin uygun lokasyona yerleştirilmesi ve uygun açı ayarının yapılmasıyla yüzdesel yüklenmeler arzu edilen seviyelere çekilemiyorsa, en azından %97 üzerinde yüklenen teçhizat sayısını minimum seviyeye indirmeye çalışarak sistemin kısıt performansını yükseltmektedir.

5.4. Batı Anadolu Bölgesinde 400/154 kV FKT incelemesi

Türkiye Elektrik İletim Sisteminde rüzgar santrallerinin yoğunlaştığı Batı Anadolu Bölgesinde rüzgardan elde edilen enerjiden kaynaklanan dengesiz yüklenmeleri ortadan kaldırmak için 400/154 kV FKT'lerin optimal yerleşimi ve açı ayarı çalışmamızın ana amaçlarından biridir. Bu doğrultuda problemin amacı ilgili bölgede kısıt durumunda yaşanan aşırı yüklenmelerin yerleştirilecek FKT ile ortadan kaldırılması veya hafifletilmesidir. Problemin çözümünde yaygın şekilde kullanılan sezgi-üstü algoritmalarından olan Parçacık Sürüş Optimizasyonu (PSO) ve Ateşböceği Algoritması (AA) kullanılacaktır. Bu algoritmalar en uygun çözüme ulaşmak için yinelemeler boyunca edinilen amacı test etmekte ve optimal sonuç elde edilene kadar veya iterasyon sayısı tamamlanana kadar optimizasyon sürecini devam ettirmektedir.

Amacımız N-1 durumunda meydana gelen aşırı yüklenme problemlerini ortadan kaldırmak olduğuna göre sezgi-üstü algoritmaların her iterasyonda sistemin kısıt analizini gerçekleştirmesi gerekir. N-1 kısıt analizi, ilgili bölgede bulunan ve bu bölgede bulunmasa dahi hedef bölgedeki güç akışlarını etkileyebilecek olan iletim hatları, ototransformatörler (OTR) ve jeneratörlerin teker teker servis harici edilerek hedef bölgedeki diğer yüksek gerilim teçhizatları üzerindeki etkilerinin analiz edildiği yaklaşımdır. Alternatif akım (AA) güç eşitliklerine göre yapılacak bir N-1 analizinde bir teçhizat servis harici edilir, AA güç akışına göre gerçekleşen yüklenme durumlarına bakılır, servis harici edilen ekipman servise alınır ve kısıt listesinde bulunan tüm teçhizatlara aynı işlem uygulanana kadar süreç devam eder. Sezgi-üstü algoritmaların onbinlerce kısıt analizi uygulayacağını düşündüğümüzde bu yöntemin zaman alacağı açıktır.

Böyle bir durumda problemi vektörize edebilmek için bazı ihmallerin yapıldığı doğru akım güç akışlarına dayalı veya kesinti dağılım faktörlerine dayalı kısıt analizi kullanılabilir. Özellikle reaktif güç rezervlerinin yeterli olduğu düşünülüyorsa lineer yöntemlerin uygulanması mümkündür. Her ne kadar lineer yöntemlerde aktif güç akışlarında da sapmalar yaşansa da bunlar ihmal edilebilecek düzeydedir. Yine de lineer kısıt analizleriyle elde edilen çıktıların lineer olmayan analizlerle test edilmesinde fayda vardır.

Batı Anadolu Bölgesinde incelenen 400/154 kV FKT'nin sadece aktif güç kontrolünü sağlayan değil aynı zamanda gerilim kontrolüne imkân veren kademe değiştiricileri bulunmaktadır. Dolayısıyla 400 kV sistemde yeterince reaktif güç rezervi bulunuyorsa aktif güç kontrolü için yapılan açı ayarlarından kaynaklanan gerilim bozulmaları, gerilim kademe değiştiricilerle sönmülenebilir. Bu doğrultuda problemin çözümünde lineer kısıt analizini kullanmak hem çözüm süresini önemli ölçüde azaltacak hem de teknik olarak kayda değer bir eksikliğe neden olmayacaktır. Çalışmamız kapsamında dağılım faktörlerine dayalı lineer kısıt analizi kullanılarak N-1 analiz süreci vektörize edilmiştir.

Deneyisel sonuçlar

Sezgi-üstü algoritmalar amaç fonksiyonunu minimize etmek için kısıt analizi yapılan bölgedeki yüklenmelerin tamamını %90'ın altına çekmeye çalışmaktadır. Sadece FKT'nin uygun lokasyona yerleştirilmesi ve uygun açı ayarının yapılmasıyla yüzdesel yüklenmeler arzu edilen seviyelere çekilemiyorsa, en azından %97 üzerinde yüklenen teçhizat sayısını minimum seviyeye indirmeye çalışarak sistemin kısıt performansını iyileştirecek şekilde kurgulanmıştır.

Bölüm 6.1’de sunulan veriler üzerinde Bölüm 6.3’te detayları açıklanan matematiksel yaklaşımın uygulanmasıyla birlikte henüz herhangi bir FKT yerleştirilmeden önce amaç fonksiyonun değeri 23757.80 olmuştur.

Tablo 2 Kısıt performansında başlangıç koşulları ile PSO ve AA sonuçlarının karşılaştırılması

	FKT Türü	Güç (MVA)	Açı (Derece)	Kısıt Sonucu
Başlangıç	-	-	-	23757.80
PSO	1.FKT	500	-6.69	5146.53
	2.FKT	500	-6.63	
AA	1.FKT	500	-6.71	4988.36
	2.FKT	500	-6.77	

PSO sonuçlarına göre Çan Havza TM’ye 2 adet 500 MVA FKT yerleştirilmiştir. FKT’lerden birinin açısı -6.69 derece olurken diğeri -6.63 bulunmuştur. PSO ile yerleştirilen FKT’ler kısıt performansında %78 oranında iyileşme sağlamıştır.

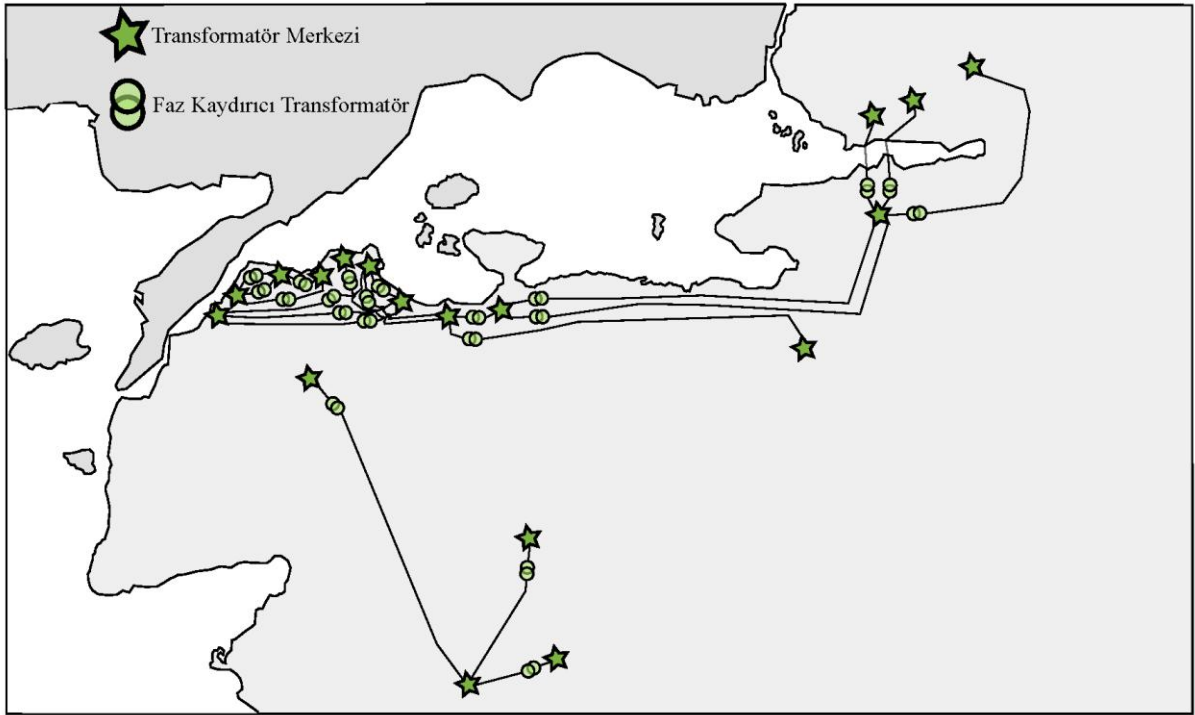
AA algoritmasından elde edilen sonuçlarda ise 2 adet 500 MVA FKT -6.71 ve -6.77 derecelik açılara ayarlanmıştır. Bu çalışma koşullarında kısıt performansında başlangıç durumuna göre %79 iyileşme sağlanırken, PSO’nun sunduğu sonuçlara göre %3 daha iyi performans elde edilmiştir.

5.5. 400 kV Gerilim Seviyesinde FKT İncelemesi

Planlama süreçlerinde 5 yıllık ve 10 yıllık genişleme senaryolarında tahmini yapılan ancak belirsizliğini koruyan çeşitli yatırımlar bulunmaktadır. Üretim ve tüketim arasında köprü görevi icra eden enerji iletim sistemi, üretim ve tüketimde yaşanacak gelişmelere paralel olarak genişlemek mecburiyetindedir. Ancak hem tüketim hem de üretimde yaşanan belirsizlikler, iletim genişlemesini zorlaştıran ana unsurlardandır. Bu nedenle İletim Sistemi Operatörü genişleme planlamasında çeşitli senaryoları değerlendirerek yatırım yapmak zorundadır. Bu doğrultuda, teknik çalışma grubumuz tarafından Güney Marmara bölgesinde 4 farklı senaryoda Faz Kaydırıcı Transformatör ihtiyaç analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde Meta-sezgisel algoritmalarla FKT konum ve açıları optimize edilmiştir.

İthal kömür santralleri projeleri Güney Marmara, Adana-Hatay illerinde yoğunlaşmıştır. Projelerin birçoğu yapılmakla birlikte Güney Marmara’da henüz yapılmamış lisanslı 2 aday proje bulunmakta olup projelerin toplam gücü ~2600 MW’tır. Kömür projeleri henüz hayata geçirilmemiş olmakla birlikte rüzgâr üretiminin en yüksek olduğu bölgelerden olan ve kurulu gücü her yıl hızla artan Güney Marmara’da söz konusu rüzgârlarla birlikte kömür projelerinin eş zamanlı devrede olması durumunun irdelenmesi adına ilgili senaryolar oluşturulmuştur. Analizlerin yapıldığı bu senaryolar RES60TES2, RES70TES2, RES80TES1 ve RES80TES2 olarak isimlendirilmiştir. Tüm senaryolar için Çiftlikköy TM’de bara dağılımı yapılarak EİH’lerin yükünü hafifletecek bir önlem alınmıştır. Ancak bara dağılımıyla çözilemeyen problemlerin FKT kullanımıyla çözülmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle çalışılan datalar üzerinde gözlemlenen aşırı yüklenmeleri hafifletecek FKT lokasyonu ve açısını tespit edebilmek

amacıyla iletim sisteminin temel durum N-1 analiz sonuçlarına göre çeşitli güzergahlar potansiyel FKT lokasyonu olarak değerlendirilmiş ve Şekil 19’da aday FKT pozisyonları gösterilmiştir. İletim sisteminde güç akışlarının değerlendirildiği maksimum yüklenme sınırları Yaz, Kış ve Termik olmak üzere üç farklı değer alır. Örneğin 400 kV 3 bundle 1272 Pheasant Enerji İletim Hattının Yaz Yüklenme Sınırı 1604 MVA, Termik Yüklenme Sınırı 1921 MVA ve Kış Yüklenme Sınırı 2610 MVA olarak değerlendirilir. Analizler yapılırken güç akışlarının hangi sınırlara göre değerlendirileceğini belirlemek gerekir. Bu doğrultuda çalışmamız kapsamında Yaz ve Termik yüklenme sınırları kullanılmıştır. Yaz Aşırı Yüklenme Sınırı için YAYS kısaltması kullanılırken, Termik Aşırı Yüklenme Sınırı için TAYS kısaltması tercih edilmiştir. Bundan sonraki bölümlerde YAYS kullanıldığında EİH üzerindeki güç akışının sınır değeri küçültülerek, amaç fonksiyonunun minimize edilmesi açısından daha zorlayıcı bir senaryodan bahsedildiği anlaşılmalıdır. Aynı şekilde TAYS uygulandığında şebeke koşullarının orta düzey bir sınırla değerlendirildiği anlaşılmalıdır. Çalışmamız kapsamında Kış Aşırı Yüklenme Sınırlarına göre herhangi bir değerlendirme yapılmamıştır.



Şekil 19 Muhtemel FKT pozisyonları

RES60TES2 Senaryosu

Rüzgâr santrallerinin %60 oranında üretim yapacağı ve bu bölgede planlanan yaklaşık toplam 2600 MW’lık her iki kömür santralinin de tamamlanacağı varsayılmıştır. Bu işletme koşullarında temel durum güç akışları ve N-1 analizi değerlendirildiğinde çalışmamız kapsamında oluşturulan matematiksel modele göre amaç fonksiyonunun 73766.53 olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda mevcut şebekede N-1 performansının yeterli olmadığı sonucuna varılabilir. Analiz detaylarına bakıldığında 22 adet kısıt sonucunda Termik Sınırlara göre toplam 66 adet %90 üzeri yüklenme meydana geldiği görülmektedir. Bu yüklenmelerden 32 tanesinin %100 üzerine çıktığı görülmektedir.

Bu senaryo kapsamında 2 farklı durum analiz edilmiştir. Her iki durumda da temel durum güç akışları YAYS değerleri dikkate alınarak hesaplanırken, N-1 analizi kapsamında meydana gelen güç akışları ise TAYS göre değerlendirilmiştir. FKT'lerin maksimum müsaade edilen açı değeri $\pm 20^\circ$ olarak belirlenmiştir. Durum 1'de 2 FKT'nin optimal konumu ve açısı belirlenerek sistemde oluşan aşırı yüklemelerin hafifletilmesi amaçlanmıştır. Durum 2'de ise aynı amaç 3 FKT kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1.Durum:

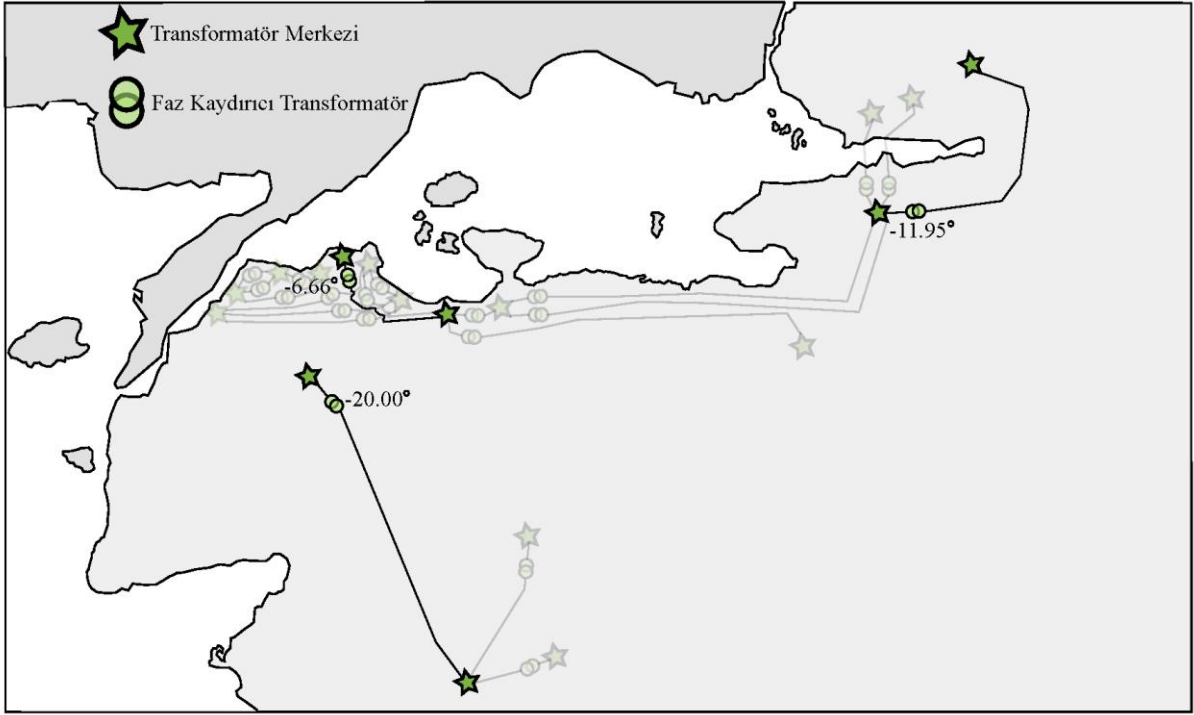
Şekil 20'de görüldüğü üzere 2 farklı lokasyona FKT yerleştirilmiştir. FKT'lerden biri -7.56° iken diğeri -20.00° olarak optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinin sonunca 2 adet FKT yerleştirilerek elde edilen amaç fonksiyonu değeri 1156.49 olmuştur. Optimal konum ve açı ayarlarıyla amaç fonksiyonunda TAYS'ye göre %98.4 oranında iyileşme sağlanmıştır. Açı ayarı yapılan şebekede 8 adet kısıtta 14 adet %90 üzeri yüklenme görülmektedir. Hem temel durumda hem de N-1 durumunda %100 üzeri yüklenen herhangi bir teçhizat bulunmamaktadır.



Şekil 20 RES60TES2 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 2 FKT'nin konum ve açısı

2.Durum:

Şebekemizde 3 farklı iletim hattına yerleştirilen FKT pozisyonları Şekil 21'de görülmektedir. Aşırı yüklenmelerin önüne geçebilmek için şebekenin uygun konumlarına yerleştirilen bu FKT'ler -6.66° , -20.00° ve -11.95° 'ye ayarlanmıştır. Optimize edilen konum ve açılarla amaç fonksiyonu 73766.53'den 0'a düşürülmüştür. Bunun anlamı yüklü şebekede ilgili bölgede planlanan 2 adet Termik Santral üretim yapıyorken %60 kapasite faktörüyle Rüzgâr üretimi söz konusuysa, yerleştirilen 3 adet FKT ile karşılaşılan kısıtların tamamının ortadan kaldırılmış olmasıdır. Başka bir ifadeyle gerek temel durumda gerek N-1 durumunda ilgili bölgede %90 üzeri yüklenen herhangi bir teçhizat bulunmamaktadır.



Şekil 21 RES60TES2 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 3 FKT'nin konum ve açısı

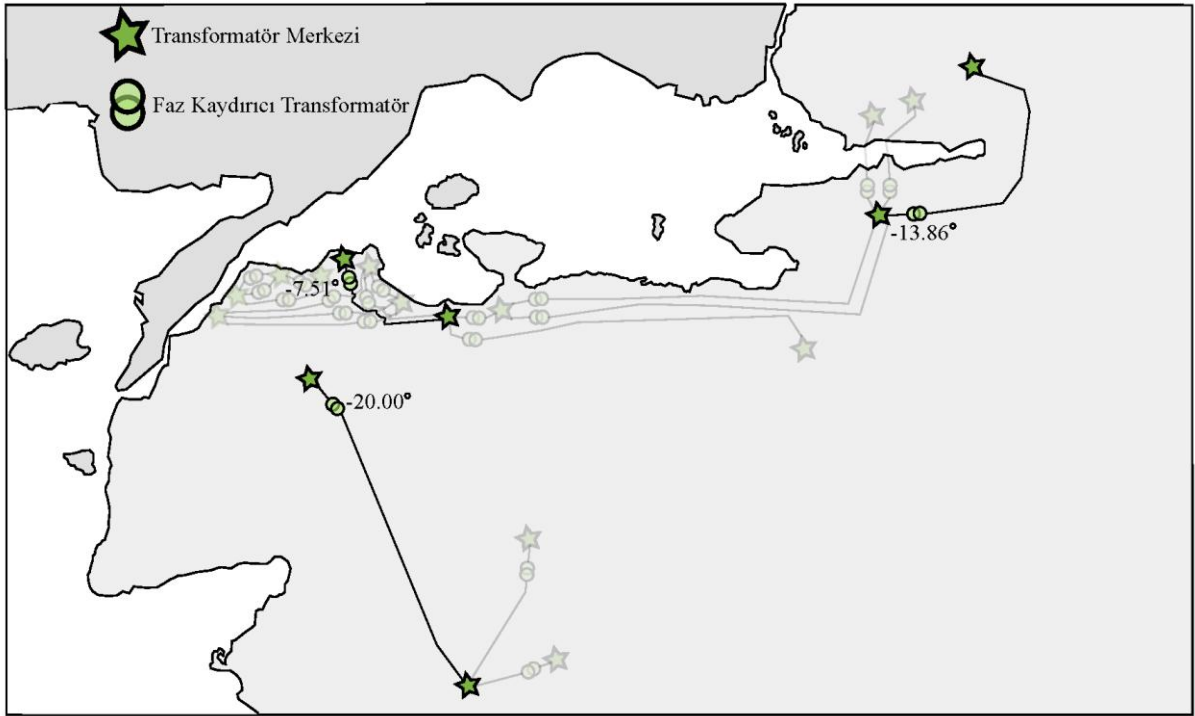
RES70TES2 Senaryosu

Rüzgâr santrallerinin %70 oranında üretim yapacağı ve bu bölgede planlanan yaklaşık toplam 2600 MW'lık her iki kömür santralinin de tamamlanacağı varsayılmıştır. Planlanan şebeke şartlarında temel durum ve N-1 durumu aşırı yüklenmeleri baz alarak oluşturulan amaç fonksiyonu 111466.88 olmaktadır. Görüldüğü üzere bir önceki senaryoda (Rüzgâr kapasite faktörü %60 iken) 73766.53 olan amaç fonksiyonu Rüzgâr üretiminde gerçekleşen sadece %10'luk bir kapasite artışıyla %51 oranında yükselmiştir. Analiz sonuçlarına göre şebekenin ilgili bölgesinde 24 adet kısıt bulunmaktadır. Bu kısıtların gerçekleşmesi halinde Termik Sınırlara göre toplam 70 adet %90 üzeri yüklenme meydana geldiği görülmektedir. Gerçekleşen yüklenmelerden 16 tanesi %100 üzerine çıkarken 16 tanesi de %110 üzerine çıkmıştır.

İlk senaryoda %60 Rüzgar kapasite faktörüne rağmen 2 FKT'li çözüm yeterli olmadığı için bu senaryoda ilgili durum test edilmemiştir. Bu senaryoda güç akışları ilk senaryoda belirtildiği gibi hesaplanmıştır. FKT'lerin maksimum müsaade edilen açı değeri yine $\pm 20^\circ$ olarak belirlenmiştir. 3 FKT'nin optimal konumu ve açısı tespit edilerek sistemde meydana gelen aşırı yüklenmelerin hafifletilmesi amaçlanmıştır.

İletim Sistemimize optimizasyon sürecinin çıktısı olarak yerleştirilen 3 FKT pozisyonu Şekil 22'de sunulmuştur. Mevcut işletme koşullarında oluşan aşırı yüklenmeleri hafifletebilmek için FKT'lerin açı ayarları -7.51° , -20.00° ve -13.86° yapılmıştır. Başlangıç durumda 111466.88 olan amaç fonksiyonu, FKT konum ve açılarının optimize edilmesiyle birlikte 998.49'a inmiştir. RES60TES2 senaryosu 2.Durum'da şebekenin Güney Marmara bölümünde amaç fonksiyonunu 0'a düşüren FKT konumlarının RES70TES2 senaryosunda da aynı olduğu görülmektedir. Açı ayarları da hemen hemen aynı olan FKT'ler, Rüzgâr kapasite faktörünün %70'e çıkmasıyla bazı kısıtlarda tüm teçhizatın %90 altında yüklenmesini sağlayamamıştır. Toplam 9 kısıtta 12 adet TAYS'ye göre %90 üzeri yüklenme görülmektedir. Ancak bu

yüklenmelerin 10 tanesi %93'ün altındadır. Şebekenin ilgili bölgesinde %100 üzerinde yüklenen teçhizat bulunmamaktadır.



Şekil 22 RES70TES2 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 3 FKT'nin konum ve açısı

RES80TES1 Senaryosu



Şekil 23 RES80TES1 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 3 FKT'nin konum ve açısı

Daha önce yapılan senaryolarda Güney Marmara bölgesinde planlanan ve toplam 2600 MW üretimi bulunan 2 adet Termik Santral varken Rüzgâr santrallerinin kapasite faktörü önce %60 ve sonra %70 yapılarak optimal FKT konum ve açı ayarlarının sistem arz güvenliğine etkisi irdelenmiştir. Bu senaryoda Rüzgâr kapasite faktörü %80'e çıkarılırken Termik santrallerden birinin devreye alındığı ve diğerinin iptal edildiği varsayılmıştır. Dolayısıyla Rüzgâr üretimi %80 gibi çok yüksek bir seviyedeysen, yaklaşık 1300 MW gücünde bir adet yeni termik santral üretim yapacaktır.

Diğer senaryolarda olduğu gibi bu senaryoda da FKT'lerin optimal konumları aynı çıkmıştır. İlgili FKT konumları ve açıları Şekil 23'te gösterilmektedir. FKT'lerin açıları -8.33° , -19.02° ve -7.40° olarak ayarlanmıştır. Belirlenen işletme koşullarında amaç fonksiyonu 0'a inmiştir. Başka bir ifadeyle Güney Marmara bölgesinde mevcut FKT konum ve açılarıyla TAYS'ye göre %90 üzerinde yüklenen bir iletim hattı bulunmamaktadır. Dolayısıyla Rüzgar üretimi %80'lik bir kapasite faktörüyle gerçekleşse dahi planlanan termik santrallerden birinin uygulanmaması durumunda kullanılan FKT'lerin iletim sistemini rahatlatığı görülmektedir.

RES80TES2 Senaryosu

Bu senaryo şebekemizin Güney Marmara bölgesinde karşılaşılabilecek en kötü senaryo olarak değerlendirilebilir. Senaryomuz kapsamında rüzgâr santrallerinin %80 oranında üretim yapacağı ve bu bölgede planlanan yaklaşık toplam 2600 MW'lık her iki kömür santralinin de tamamlanacağı varsayılmıştır.

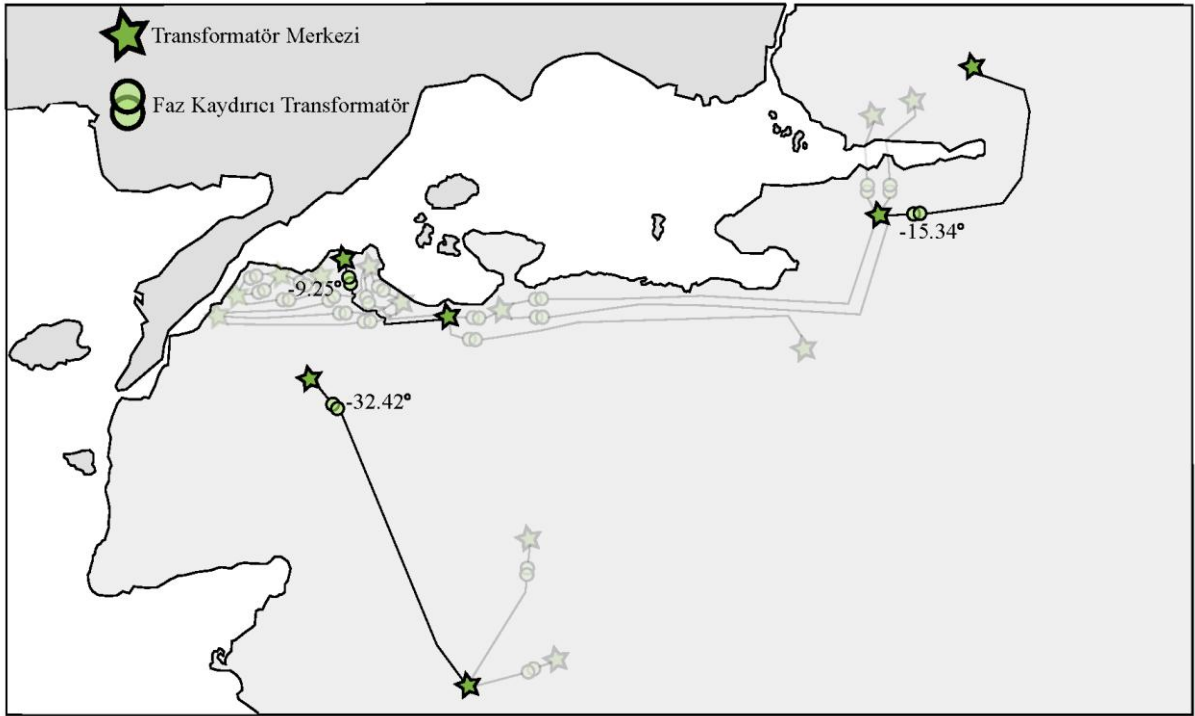
Çiftlikköy TM'de yapılan bara düzenlemesinin ardından temel durumda İzmir, Bursa ve Denizli bölgelerinde bulunan 400 kV EİH'leri kapsayan teçhizattan YAYS'ye göre %90 üzerinde yüklenen iletim hattı bulunmamaktadır. Ancak ilgili bölgede bulunan 400 kV EİH'ler ile oluşturulmuş 86 adet kısıttan 37'sinde %90 üzeri 146 adet yüklenme kaydı alınmıştır. Bu yüklenmelerden 66 adedi %100 üzerindedir. Ham data üzerinde yapılan analiz sonuçları detaylı incelendiğinde kısıtlarda %100 üzeri yüklenen 12 adet iletim hattı bulunurken bazı EİH'ler 9 farklı kısıt türünde aşırı yüklenmiştir. Bu çalışma kapsamında oluşturulan matematiksel modele göre ham verilerin N-1 performansı, bir başka ifadeyle amaç fonksiyonun sonuç değeri 142302.39 çıkmaktadır. Bu sonuç N-1 performansının yeterli olmadığı gerçeğini ortaya çıkarmaktadır.

Bu senaryo kapsamında üç farklı durum analiz edilerek optimal FKT konum ve açısının elde edilmesi amaçlanmıştır. Daha önceki senaryolarda FKT'ler maksimum $\pm 20^\circ$ 'ye ayarlanabilmekteydi. Ancak bu senaryoda herhangi bir açı sınırı koyulmamış olup, ihtiyaç duyulan en büyük açının gözlemlenmesi amaçlanmıştır. 1. Durumda 20 adet aday FKT konumundan en fazla 3 adet FKT'nin belirlenmesi ve TAYS'ye göre sistem arz güvenliği performansını iyileştirecek optimal açıların elde edilmesi amaçlanmıştır. 2. Durumda aynı amacın 4 adet FKT kullanılarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. 3. Durumda ise 4 adet FKT kullanarak YAYS'ye (TAYS'ye oranla daha düşük bir sınır değeri) göre N-1 performansını iyileştirecek FKT konumlarının ve açılarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.Durum:

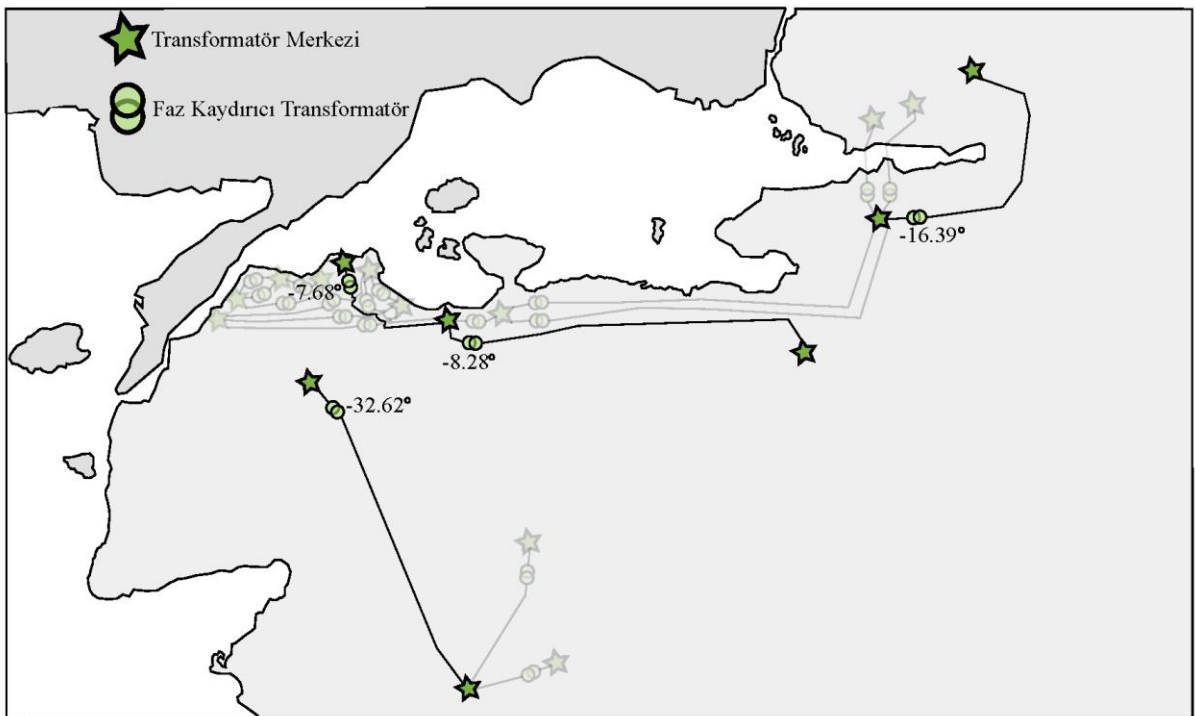
En fazla 3 adet FKT yerleştirilecek şekilde tasarlanan optimizasyon sürecinin sonucunda amaç fonksiyonunun nihai değeri 1364.63 olmuştur. Şekil 24'te görüldüğü üzere 3 farklı noktada çeşitli açılarda FKT kullanılmıştır. İlgili FKT'lerde -9.25° , -15.34° ve -32.42° 'lik açı ayarlarıyla amaç fonksiyonunda TAYS'ye göre %99 oranında iyileşme sağlanmıştır. Açı ayarı yapılan

şebekede 9 adet kısıtta 16 adet %90 üzeri yüklenme görülürken %100 üzeri yüklenen herhangi bir teçhizat bulunmamaktadır.



Şekil 24 RES80TES2 senaryosunda bulunan optimal çözüme göre 3 FKT'nin konum ve açısı

2.Durum:

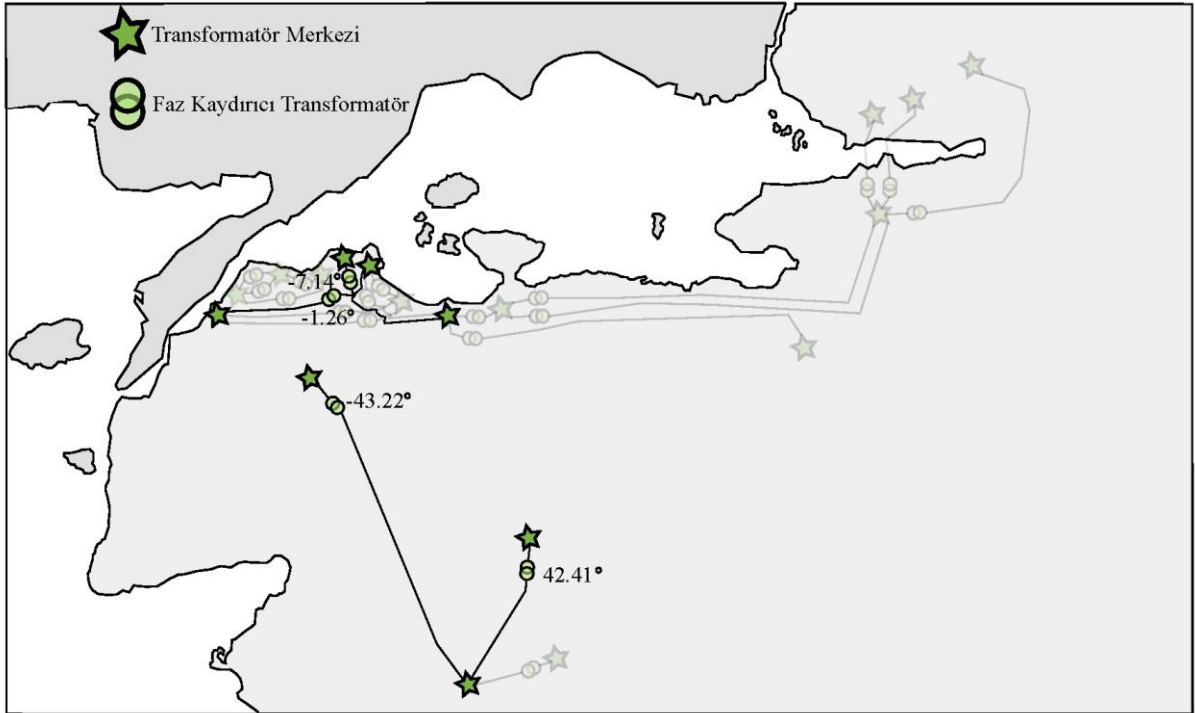


Şekil 25 RES80TES2 senaryosu 2.Durumda elde edilen optimal çözüme göre 4 FKT'nin konum ve açısı

4 adet FKT lokasyonu ve açıları Şekil 25'te gösterilmektedir. TAYS'ye göre yapılan temel durum ve N-1 durumu analiz sonuçlarına göre %90 üzerinde yüklenen herhangi bir teçhizat bulunmamaktadır. Bu nedenle şebekenin ilgili bölgesinde ham verilerde karşılaşılan 146 aşırı yüklenmenin tamamı optimal FKT konum ve açılarıyla ortadan kaldırılmıştır.

3.Durum:

Durum 2'de yapılan analizlerle doğru FKT lokasyonu ve açısıyla TAYS'ye göre sistemdeki kısıtların tamamının ortadan kaldırılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir. Durum 3'te ise 4 adet FKT'nin YAYS'ye göre sistemdeki aşırı yüklenmeleri minimize etmesi amaçlanmıştır. Termik sınırlara göre herhangi bir açı ayarı yapılmayan ham şebeke koşullarında amaç fonksiyonu 142302.39 olarak ifade edilmiştir. YAYS'ye göre ise bu rakam 159753.67'ye yükselmiştir. Çünkü yaz yüklenme sınırları termik sınırlara göre daha düşük değerlerdedir. Şekil 26'da gösterilen FKT konumları ve açılarıyla amaç fonksiyonu 5613.76'ya düşürülmüştür. Böylece amaç fonksiyonunda %96.5 iyileşme sağlanarak aşırı yüklenen iletim hatlarında önemli miktarda rahatlatma sağlanmıştır. Üstelik ilgili bölgede herhangi bir kısıtta herhangi bir EİH %100 üzerinde yüklenmemiştir.



Şekil 26 RES80TES2 senaryosu 3.Durumda elde edilen optimal çözüme göre 4 FKT'nin konum ve açısı

Uygulamaya dönük bakıldığında 1400 MVA gücünde bir FKT'de -43°'lik bir açı ayarının mevcut teknolojik bilgi birikimiyle mümkün olmadığı görülmektedir. Bu nedenle en zorlayıcı senaryo olan RES80TES2 verisi üzerinde yapılan analizler göstermektedir ki bu koşulların gerçekleşmesi durumunda ortaya çıkacak problemler sadece FKT yatırımlarıyla çözülebilecek düzeyde değildir.

Senaryolar Hakkında Genel Değerlendirme

Güney Marmara bölgesinde yapılması planlanan 2 adet toplam 2600 MW'lık ithal kömür santrallerinin yanında çeşitli rüzgâr üretim profillerine göre farklı senaryolar oluşturularak şebekemizin 400 kV gerilim seviyesinde FKT gereksinimi araştırılmıştır. Yapılan analizler ışığında TAYS'ye (Termik Aşırı Yüklenme Sınırlarına) göre rüzgâr üretiminin %60 olduğu ve planlanan 2 adet termik santralin kurulduğu senaryo ile rüzgâr kapasite faktörünün %80 olduğu ve termik santrallerden sadece birinin işletmeye alındığı senaryoda, 3 adet FKT kullanımıyla aşırı yüklenmeler tamamen önlenmiştir.

Tüm senaryolar incelendiğinde açılar senaryodan senaryoya küçük miktarda değişse de 3 adet FKT konumunun değişmediği görülmektedir. Bu lokasyonlar, 400 kV Çan Havza – Soma B, Karabiga – Bandırma ve Çiftlikköy – Makine OSB iletim hatlarıdır. Bu hatlarımıza uzun ömürlü olması amacıyla yerleştirilecek **1630 MVA ve $\pm 24^\circ$** FKT'lerin karşılaşılabilecek birçok senaryoda iletim sistemimizin daha etkili işletilmesini sağlayacağı düşünülmektedir. Aşırı yüklenen iletim hatlarının rahatlatılarak transfer kapasitesinin yükseltilmesi ve mevcut iletim kapasite faktörünün iyileştirilmesi bakımından FKT'lerden yararlanılması, teknik çalışma grubumuz tarafından tavsiye edilmektedir.

Türkiye İletim Sisteminde FKT kullanımına başlanmasındaki en büyük engellerden biri iletim sistemi genişleme planlamasının, küresel trendler, piyasa dinamikleri ve yüksek büyüme eğimi gibi nedenlere bağlı olarak hızla değişmesidir. FKT uygulamalarının belirlenmiş bölgelere dayalı olarak tasarlanması nedeniyle hızlı değişen şebeke koşullarına uyum sağlaması zorlaşmaktadır. FKT kullanımının amaçlarından biri darboğazlardaki sıkışıklığı rahatlatarak kullanılan iletim kapasitesini artırmaktır. Ancak örneğin, bu çalışmanın başlangıcında FKT yerleşimi için hedeflenen bölgede Yatırım Programında (YP) bulunmayan 2 yeni koridor ve 1 yeni Transformatör Merkezi, sadece 2 yıl içinde iletim sistemi genişleme planlamasında yapılan değişikliklerle YP'ye eklenmiştir. Dolayısıyla, değişen sistem planlama koşulları FKT'ler için belirlenen lokasyon ve açı değerleri üzerinde önemli değişikliklere yol açabilir.

6. Faz Kaydırıcı Transformatör Teknik Şartname Parametreleri

Faz kaydırma transformatörlerinin tasarımı için minimum gerekli parametreler şebeke analizleri kapsamında transformatör üreticilerine tebliğ edilmelidir. Bu parametrelere ek olarak, transformatörün tasarımını etkileyebilecek çalışma yüksekliği, çevre sıcaklığı vb. standart tip transformatör dış etken parametreleri de mutlaka paylaşılmalıdır.

6.1. Önemli Tasarım Hususları

- **Faz Açısı:** FKT'nin sağlayabileceği faz açısı sınırlıdır. Kullanılan FKT'nin türü, bağlantı şekilleri, nominal gücü gibi faktörler sağlanabilecek açı miktarını değiştirmektedir. Şebeke koşullarına göre ihtiyaç duyulan açı miktarı özenle belirlenmeli ve üreticiye yük altında kaç derecelik bir açı ayarına ihtiyaç duyulduğu net bir şekilde ifade edilmelidir. Nominal faz açısı ifadesinin yüksüz durum koşulları dikkate alınarak tanımlandığı unutulmamalıdır. Ayrıca ihtiyaç duyuluyorsa FKT'nin her iki yönde de (ileri (advanced) ve geri (retard) pozisyonunda) açı ayarı yapabilecek kabiliyette olması talep edilmelidir. Örneğin Batı Anadolu Bölgesinde yapılan analizler ışığında, buraya yerleştirilecek 400/164 kV Faz Kaydırıcı Oto-transformatörün yük altında -7°'lik bir açı ayarı yapabilmesi gerekmektedir. Çan Havza TM'de bulunan OTR'lerin yüksek rüzgar üretiminin bulunduğu saatlerde 154 kV gerilim seviyesinden 400 kV gerilim seviyesine doğru yüksek miktarda güç akışı meydana gelmesi nedeniyle, bu güç akışını sınırlandırmak amacıyla negatif açı ayarına ihtiyaç duyulmuştur. Ancak 400 kV gerilim seviyesinden 154 kV gerilim seviyesine doğru yoğun güç akışı meydana gelen senaryolar için pozitif açı ayarına da ihtiyaç duyulacaktır. Bu nedenle FKT'nin yerleştirileceği konumun özelliğine göre tasarım yapılmalı ve gerekiyorsa FKT her iki yönde de kaydırma yapabilme kabiliyetine sahip olmalıdır.
- **Nominal Güç:** Yüksek güçlü FKT'ler bir seri ve bir uyartım trafosu olmak üzere iki adet ayrı tank kullanılarak oluşturulan Quadrature Booster teknolojisiyle üretilmektedir. Ancak tasarımsal zorluklar nedeniyle güç ile açı arasında ters ilişki olduğu için makul bir denge noktasının saptanması önemlidir. Bir FKT'nin tasarım kapasitesi, nominal gerilimde ölçülen görünür güç ile ifade edilmektedir. İleri veya geri pozisyonunda yapılacak açı ayarıyla FKT'nin maruz kalacağı görünür güç miktarı şebeke koşulları da gözetilerek titizlikle değerlendirilmelidir. Örneğin çalışma grubumuzun faaliyetleri kapsamında Türkiye Şebekesi Batı Anadolu Bölgesinde 400 kV seviyesinde çeşitli analizler yapılmış ve farklı lokasyonlara FKT yerleştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak bu bölgeye yerleştirilecek bir FKT'nin minimum 1630 MVA gücünde olması ve $\pm 24^\circ$ kaydırma kabiliyeti olması gerektiği tespit edilmiştir. Belirlenecek görünür güç kapasitesinin gelecekte oluşacak yük artışlarını da kapsaması gerekmektedir. Ancak yine de uzun dönemde belirlenen güç miktarının düşük kalması durumunda birden fazla FKT'nin paralel olarak bağlanmasıyla birlikte daha yüksek bir toplam çıkış gücünün elde edilmesi de mümkündür. PST ana ünitesinin (şönt trafo) ve seri ünitesinin MVA derecesi, sistemin özel güç akış kontrolü ve diğer uygulama ihtiyaçlarına göre belirlenmelidir. Bireysel şönt ve seri birimin nominal güç miktarı, projeye özel tasarım gereksinimleri için farklı olabilir. Örneğin Hindistan elektrik şebekesindeki ilk PST'nin (315 MVA, 400/220/55/33 kV şönt ünitesi ve 105 MVA, 35/55 kV seri ünitesi ile) tasarım ve kurulum deneyimi [7]'de açıklamaktadır.
- **FKT Türü:** Şönt ve seri trafo üniteleri bulunan FKT tasarımları tek çekirdekli veya çift çekirdekli olmasına göre ortak bir kazanda veya farklı kazanlar kullanılarak imal

edilebilir. İmal edilen FKT'lerin nakliye kısıtları, özellikle 400 kV ve üzeri gerilim seviyesinde çift çekirdek FKT tasarımı gerektirmekte olup, nominal gücün yüksek tutulması ise üç fazlı tek FKT yerine tek fazlı 3 adet FKT'nin değerlendirilmesini gerektirebilir [53]. Örneğin Çan Havza TM için önerilen 400/164 kV Faz Kaydırıcı Oto-transformatörün türü Direkt Asimetrik olmalıdır. Gerilim genliğinde yaşanacak değişiminde gerilim kademe şalteriyle düzenlenmesi gerekir. Normalde tek çekirdekte imal edilecek bu FKT'nin gerilimin hem genliğini hem de açısını değiştirmesi söz konusudur. Ancak FKT'ye eklenecek yük altında gerilim kademe değiştiricisiyle birlikte açı değiştiğinde meydana gelen gerilim değişimleri absorbe edilebilecektir. Bu FKT 250 MVA gücünde tasarlanırsa üç fazlı olarak düşünülebilir. Ancak eğer gücünün 500 MVA üzerinde olması istenirse üç adet tek faz FKT'nin tasarlanması tercih edilebilir. Diğer yandan 400 kV için önerilen FKT tasarımı İndirekt Simetrik FKT kategorisine girebilir. Quadrature Booster (QB) olarak bilinen bu FKT yüksek güçlü uygulamalarda tercih sebebidir. 400 kV seviye için önerilen FKT'nin nominal gücü minimum 1630 MVA olduğu için QB teknolojisinin kullanılması faydalı olacaktır. Bu bölgede QB yerine İndirekt Asimetrik bir FKT'nin tercih edilmesi durumunda ise gerilim genliğinde yaşanan bozulmanın 400 kV gerilim seviyesinde bulunan üretim santrallerinin ikaz akımları veya sistemde bulunan şönt ve seri ekipmanın devreye alınıp çıkarılması yoluyla düzeltilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

6.2. Ek Öneriler

- FKT'nin ileri faz kaydırma pozisyonunda (advanced phase-shift position) yük altındayken, meydana gelecek gerilim düşümü nedeniyle hedeflenen faz açısında çalışması mümkün olmayabilir. Geri pozisyonda (retard position) ise faz açısı, yüksüz durum koşullarında belirlenmiş açı limitini aşmamalıdır. Bu sınırın aşılması, transformatör çekirdeklerinde belirli bir derecede aşırı uyarılmaya neden olabilir.
- Fazör diyagramları, yapılacak gereksinim analizi sonrası gerilim ve faz açısı değerleri düşünülerek hazırlanmalıdır.
- Empedans gereksinimleri, analizler sonucunda gerekli ise uç kademelerde ve farklı faz kaydırma durumlarında da verilmelidir. En azından maksimum/minimum değerler olarak verilebilir.
- İzolasyon deneyleri için fabrika testlerinde uygulanması gereken değerler IEC'ye göre ya da şebekenin üst gerilimlerine göre belirlenmelidir. Gerekli ise Switching Impulse (Anahtarlama Darbesi) ya da Chopped Wave (İzolasyon testinde Kesikli Dalga) değerleri de teknik parametrelerde belirtilmelidir.
- FKT durumlarına ve açılara göre gerekli görülür ise istenilen kayıp değerleri genişletilebilir.
- Buşingler ile ilgili bilgiler, FKT'nin lokasyonuna göre belirlenebilir. Yer altı kablolu olma durumunda yağlı kablo kutulu tercih edilebilir. Buşing akım ve üst gerilim değeri de çevre koşullarına ve aşırı yüklenme koşullarına göre belirlenebilir. Aynı şekilde gerekli krepaj değeri de standartlara atıf ile ya da daha üst seviyeden belirlenebilir. Buşingler arası açıklıklar da gerekli ise genişletilebilir.
- Akım transformatörleri, kullanılacak izleme ve koruma sistemine göre belirlenmelidir. Benzer şekilde kullanılacak koruma ve izleme ekipmanları da istenilen şekilde eklenebilir (ör. OLTC tipi, yağ seviye göstergeleri, sıcaklık göstergeleri, izleme sistemi vb...)

6.3. Teknik Data Sayfası

Transformatörlerin teknik veri sayfasında istenebilecek parametrelere örnekler Tablo 3'te belirtilmiştir. Tabloda belirtilen değerler örnek teşkil etmesi amacıyla paylaşılmıştır. Uygulama yapılacak FKT için tanımda belirtilen parametreler ayrı ayrı değerlendirilerek teknik şartname esasları oluşturulmalıdır.

Tablo 3 FKT Teknik Data Sayfası örnek parametreleri

Madde	Tanım	Talep Tanım veya Değerleri (ÖRNEK)
1	İlgili standart	IEC
2	FKT Tipi (belirli ise)	Ototrafo lu FKT, Çift Aktif, Simetrik vb.
3	Bağlantı grubu sembolü	YNa(0°,±6°)
4	Çalışma Koşulları	40°C Çevre Sıcaklığı, <1000m Yükseklik...
5	Frekans	50Hz
6	Güç	200MVA
7	Soğutma Şekli ve Kademeleri	ONAN/ONAF, 150/200MVA
8	Aşırı Yüklenme Koşulu (varsa)	1.3 Overload 30dk. vb.
9	Çalışma Boşta Gerilimleri	330/161kV
10	İzolasyon Gerilimleri (Um) ve Tipi	362/170kV - Kademeli
11	Yıldırım Darbe Testi (1.2/50us kVpeak) YG AG	1175/1050 kV 650/325 kV
12	Switching Impulse YG	1050 kV

13	Endüklenmiş Gerilim Testi (kV, rms) YG AG	540kV 275kV
14	0° Açıda Ayar Aralığı	161±8x1.25%
15	Faz Kaydırma Açıları	Poz. 17 (Gerilim ve Faz Kaydırma Kademesi) : ±δmax=6° Poz. 1 (Gerilim ve Faz Kaydırma Kademesi) : ±δmax=9.55°
16	Fazör Diyagramları	1cm = 10kV $\Delta e_U = \Delta e_V = \Delta e_W = 2 \times 12kV$ N = neutral of common winding
17	Empedanslar (%uk) (250MVA baz, 50Hz 75°C)	330/161kV: 10%
18	Boşta Kayıplar (Nom. Kademedede)	<60kW
19	Yükte Kayıplar (200MVA baz, 50Hz 75°C)	<380kW

20	Terminal Tipi YG: AG:	Havai Tip, OIP Havai Tip, OIP
21	Akım Transformatörü Bilgileri	Koruma, 500/5-5A, 50VA 10P20 Ölçüm, 500/5A, 30VA Class 0.5, 10P20
22	Toplam Boyut ve Ağırlık Bilgileri	265 ton (tüm ünite, yağ dolu) 160 ton (FKT nakliye ağırlığı) 14100x5800x8830 (Uzunluk x Derinlik x Yükseklik - Tüm ünite) [mm] 11300x4000x4300 (Uzunluk x Derinlik x Yükseklik - FKT nakliye ölçüleri) [mm]

Tablo 4 Ototransformatör ile Faz Kaydırmalı Ototransformatörün Boyut ve Ağırlıkları

Transformatör Türü	Gerilim [kV]	Boyut (UxDxY) [mm]	Toplam Ağırlık [ton]	Nakil Boyutu (UxDxY) [mm]	Nakil Ağırlığı [ton]
250 MVA OTR	400/164	15050x6000x10160	205,5	8650x3100x4250	143,5
450 MVA OTR	400/164	15150x5950x9620	265,1	9350x3500x4500	190
200 MVA FKT	330/161	14100x5800x8830	265	11300x4000x4300	160
250 MVA FKT	400/164	14800x6900x10300	353	12300x4200x4700	217

Tablo 4'te Türkiye şebekesinde kullanılan ototransformatörler ile faz kaydırmalı ototransformatörlerin boyut ve ağırlık verileri sunulmuştur. Veriler incelendiğinde 330/161 kV 200 MVA FKT, gerek gerilim seviyesinin görece düşük olması gerek gücünün 250 MVA OTR'ye göre 50 MVA daha az olması nedeniyle hem boyut hem de ağırlık bakımından avantajlı görünmektedir. Ancak Türkiye şebekesinde kullanılmasını önerdiğimiz 400/164 kV 250 MVA FKT, hali hazırda şebekede kullanılan 450 MVA OTR'ye göre bile hem boyut hem de ağırlık açısından dezavantajlı görünmektedir. Çalışma grubumuz faaliyetleri kapsamında tasarlanan 400/164 kV 250 MVA Faz Kaydırmalı Ototransformatör boyut ve ağırlıkları tasarımda yapılacak optimizasyon ile daha makul seviyelere getirilebilir. Çeşitli analizler ışığında Şebekemiz için fayda saylayacağını gösterdiğimiz FKT'lerin, şebekemize entegrasyonu sağlanmadan önce FKT tasarımıındaki fiziksel koşulların irdelenmesi ve mümkünse iyileştirilmesi gerekmektedir.

Kaynakça

- [1] Soliman IA, Abd el-Ghany HA, Azmy AM (2019) A robust differential protection technique for single core delta-hexagonal phase-shifting transformers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 109:207–216. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.02.015.
- [2] Soliman IA, El-Ghany HAA, Azmy AM (2018) A Proposed Algorithm for Current Differential Protection of Delta Hexagonal Phase Shifting Transformer. In: 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, Cairo, Egypt, pp 785–790.
- [3] Mohamed SA, Abdel-Rahim A-MM (2018) Phase-Shifting Transformers' Model for Optimal Load Flow Formulation. In: 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, Cairo, Egypt, pp 589–594
- [4] Verboomen J. Optimisation of transmission systems by use of Phase Shifting Transformer. PhD, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2008.
- [5] Xiaonan Y, Hongkun C, Xiaochun Z, Zhengfeng W, Xu W, Yunting S, Jian D (2015) Modeling and control of thyristor controlled phase shifting transformer. In: 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA). IEEE, pp 1–6.
- [6] Ptacek J, Modlitba P, Vnoucek S, Cermak J (2006) Possibilities of applying phase shifting transformers in the electric power system of the Czech Republic. CIGRE, C2_203, Session.
- [7] Jithin Sundar SVN, Yuvaraju A, Radhakrishna C, Manoj K, Sachdeva S (2014) Design, testing, commissioning and operational experience of first phase shifting transformer in Indian network. CIGRE, A2_205, Session.
- [8] Verboomen J, Spaan FJCM, Schavemaker PH, Kling WL (2008) Method for calculating total transfer capacity by optimising phase shifting transformer settings. CIGRE, C1_111, Session.
- [9] Constantin C, Eremia M, Toma L (2013) Power flow control solutions in the Romanian power system under high wind generation conditions. In: 2013 IEEE Grenoble Conference. pp 1–6.
- [10] El Hraïech A, Ben-Kilani K, Elleuch M (2014) Control of parallel EHV interconnection lines using Phase Shifting Transformers. In: 2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14). IEEE, pp 1–7.
- [11] Warichet J, Leonard J-L, Rimez J, Bronckart O, Van Hecke J (2010) Grid implementation and operational use of large phase shifting transformers. In: CIGRE Session, Location: Paris.
- [12] Rimez J, Wiot D, Jottrand E, Van Der Planken R, Claessens G, Declercq J (2006) Grid implementation of a 400 MVA 220-150KV -15° - $+3^{\circ}$ phase shifting transformer for power flow control in the Belgian network -specification and operational considerations. CIGRE, A2_202, Session.
- [13] Iuliani V, Di Giulio A, Palone F, Rebolini M, Zunino S, Ubaldini M, Badini S, Cannavale G, Del Carro M, Lombini L, Caprio G, Vitiello A, Albani PL, Ferrari F (2014) New phase

shifting transformers in the Italian transmission network. Design, manufacturing, testing and electromagnetic transients modelling. CIGRE, A2_207, Session.

[14] Lubicki W, Kocot H, Korab R, Przygodzki M, Tomasik G, Żmuda K (2014) Improving the cross-border transmission capacity of Polish power system by using phase shifting transformers. CIGRE, C1_108, Session.

[15] Sweeney R, O'Donoghue P, Gaffney P, Stewart G (2002) The specification and control of the phase shifting transformers for the enhanced interconnection between Northern Ireland and the Republic of Ireland. CIGRE. pp 14-118.

[16] Mohsin QK, Lin X, Wang Z, Sunday O, Khalid MS, Zheng P (2014) Iraq network 400kV, 50Hz interconnect with Iran, Turkey and Syria using phase-shifting transformers in control and limit power flow of countries. In: 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). pp 1–6.

[17] Carlini EM, Manduzio G, Bonmann D (2006) Power flow control on the Italian network by means of phase-shifting transformers. CIGRE, A2_206, Session.

[18] Kling WL, Klaar DAM, Schuld JH (2004) Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity. In: CIGRE Session, Location: Paris.

[19] Wolfram M, Marten A-K, Westermann D (2016) A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer setting optimization. In: 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). IEEE, Leuven, Belgium, pp 1–6.

[20] Linortner G (2014) Phase shifting transformers, specific issues with regard to design and testing. In: 2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application. pp 1–4.

[21] Colla L, Iuliani V, Francesco P, Rebolini M, Zunino S (2011) Modeling and electromagnetic transients study of two 1800MVA phase shifting transformers in the Italian transmission network. International conference on power systems transients (IPST 2011), Netherlands.

[22] Sidea DO, Eremia M, Toma L, Bulac C, Optimal Placement Of Phase-Shifting Transformer For Active Power Flow Control Using Genetic Algorithms, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 80, Iss. 1, 2018.

[23] Sidea DO, Toma L, Eremia M (2017) Sizing a phase shifting transformer for congestion management in high wind generation areas. In: 2017 IEEE Manchester PowerTech. IEEE, Manchester, United Kingdom, pp 1–6.

[24] Kawaura Y, Yamanouchi S, Ichihara M, Iwamoto S, Suetsugu Y, Higashitani T (2016) Phase-shifting transformer application to power-flow adjustment for large-scale PV penetration. In: 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). IEEE, Singapore, pp 3328–3331.

[25] Cai N, Khatib AR, Saenz A, Bottyan J (2018) Real-Time Automation Control of a Phase-Shifting Transformer Based on Mission Priorities. In: 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). IEEE, Denver, CO, pp 1–9.

- [26] Martínez-Anido CB, L'Abbate A, Migliavacca G, Calisti R, Soranno M, Fulli G, Alecu C, de Vries LJ (2013) Effects of North-African electricity import on the European and the Italian power systems: a techno-economic analysis. *Electric Power Systems Research*. 96:119–132.
- [27] Ugalde-Loo CE, Ekanayake JB, Jenkins N (2011) Subsynchronous resonance on series compensated transmission lines with quadrature boosters. In: 2011 IEEE Trondheim PowerTech. pp 1–7.
- [28] IEEE Special Publication (1999) Protection of phase angle regulating transformers (PAR), a report to the substation subcommittee of the IEEE power system relaying committee prepared by working group K1.
- [29] Gajić Z, Podboj M, Traven B, Krašovec A (2012) When existing recommendations for PST protection can let you down. In: 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP). pp 1–6.
- [30] Khan U, Sidhu TS (2014) New algorithm for the protection of delta-hexagonal phase shifting transformer. *Transmission Distribution IET Generation*. 8(1):178–86.
- [31] Khan UN, Sidhu TS (2014) A Phase-Shifting Transformer Protection Technique Based on Directional Comparison Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 29(5):2315–23.
- [32] Solak K, Rebizant W, Schiel L (2014) EMTP testing of selected PST protection schemes. In: Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). pp 85–90.
- [33] Bhasker SK, Tripathy M, Kumar V (2014) Indirect symmetrical PST protection based on phase angle shift and optimal radial basis function neural network. In: 2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC). pp 1–6.
- [34] Bhasker SK, Tripathy M, Kumar V (2014) Wavelet transform based discrimination between inrush and internal fault of indirect symmetrical phase shift transformer. In: 2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition. pp 1–5.
- [35] Solak K, Rebizant W, Schiel L (2015) Differential protection of single-core symmetrical phase shifting transformers. In: 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). pp 221–6.
- [36] Wirmond VE, Fernandes TSP, Tortelli OL (2011) TCPST allocation using optimal power flow and Genetic Algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 33(4):880–6.
- [37] Purwoharjono P, Penangsang O, Abdillah M, Soeprijanto A (2012) Optimal Design of TCPST Using Gravitational Search Algorithm. In: 2012 Sixth UKSim/AMSS European Symposium on Computer Modeling and Simulation. pp 323–8.
- [38] Swaroopan NMJ, Somasundaram P (2011) Optimal Power Flow for security enhancement using Fuzzified Particle Swarm Optimization. In: International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON). pp 474–9.
- [39] Dag GO, Bagriyanik M (2011) A fuzzy-genetic algorithm based approach for controlling unscheduled flows using SC and PST. In: 2011 North American Power Symposium. pp 1–5.

- [40] Martínez-Lacañina PJ, Marcolini AM, Martínez-Ramos JL (2014) DCOPF contingency analysis including phase shifting transformers. In: 2014 Power Systems Computation Conference. pp 1–7.
- [41] Thakurta PG, Hertem DV, Belmans R (2011) An approach for managing switchings of controllable devices in the Benelux to integrate more renewable sources. In: 2011 IEEE Trondheim PowerTech. pp 1–7.
- [42] Belivanis M, Bell KRW (2014) Coordination of the settings of phase-shifting transformers to minimize the cost of generation re-dispatch. CIGRE, C2_204, Session.
- [43] Tümay M., Demirdelen T., Bal S., Doğru B., Cicibaş A., Köseoğlu A. K., Aksoy M. “Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Dünyadaki Durumu ve Uygulama Alanlarının Literatür İncelemesi”, Güç Sistemleri Konferansı, 2016 (Cigre Türkiye).
- [44] Ilıceto F., Marton F., Darku, C., “EHV/HV Autotransformers with In-Phase and In-Quadrature Voltage Regulation; Applications in Ghana”. Cigre - Session Papers & Proceedings - A2-104, 2012.
- [45] Siemens Phase Shifters. (n.d.). Retrieved April 01, 2021, from <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/transformers/phase-shifting-transformers.html>
- [46] <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/transformers/phase-shifting-transformers.html>, erişim tarihi 23.11.2022.
- [47] https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:6ba88ca2-ce25-49fb-a3a5-2d225a682e59/phase-shifter-with-ester-flyer-en-new.pdf?ste_sid=74c39f72be1ffe2613b6ff3771e7c713, erişim tarihi: 24.11.2022.
- [48] <https://cea.nic.in/old/reports/committee/nrce/nrceminutes-5.pdf>, erişim tarihi: 01.12.2022.
- [49] https://www.industrial-electronics.com/transformers_7e.html, erişim tarihi: 07.01.2023.
- [50] IEC60076-1 International Standard, Power Transformers 1997-2013.
- [51] Erdoğan M., “Phase-shifting Autotransformer”, Transformers Magazine, 5(1), 94-100, 2018.
- [52] SIEMENS, Application Program Interface., Siemens Power Technologies International, 2018.
- [53] Manna T., “Design Considerations in Phase-Shifting Transformers to Enhance Loadability and Controllability of the Connected Grid”, CIGRE US National Committee, 2022, Grid of the Future Symposium.