

ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ ALTYAPISI VE YÜK DENGESİZLİKLERİNİN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE NEDEN OLDUĞU ZORLUKLAR VE ÇÖZÜM STRATEJİLERİ

Fatma AVLİ FIRIŞ
Doktor Öğretim Üyesi

Bildiri ID Numarası: 0113

Elektrikli Araçlar ve Dağıtım Şebekelerine Etkisi

Genel Bakış



Yeni Nesil Talep Profilleri

Elektrikli araçlar (EA), sabit olmayan ve yoğunlaştırılmış yük profilleriyle dağıtım şebekelerinde ani talep değişimlerine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle mesai sonrası saatlerde yoğunlaşarak gerilim dalgalanmalarına yol açmaktadır.



Çift Yönlü Enerji Etkileşimi

Araçtan şebekeye (V2G) teknolojileri, elektrikli araçların yalnızca tüketici değil aynı zamanda enerji sağlayıcı birimler olarak değerlendirilmesini mümkün kılarak şebeke esnekliğine katkı sağlar.



Şebeke Altyapısına Baskı

Artan EA penetrasyonu, mevcut dağıtım sistemleri üzerinde yüksek güç çekişine neden olarak transformatör ve kablolama sistemlerini zorlamaktadır. Kritik şehir içi bölgelerde aşırı yüklenme riski artmaktadır.



Enerji Politikalarında Dönüşüm

Elektrikli araçlar, enerji ve ulaşım sektörlerinin birleşiminde yer alarak yeni düzenleyici çerçeveleri ve yatırım önceliklerini şekillendirmektedir. Bu dönüşüm, sadece teknolojik değil aynı zamanda stratejik bir değişimdir.

Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Faz Dengesizliklerinin Bütüncül Analizi

- **Çalışmanın Temel Amacı:** Elektrikli araç şarj altyapısı ve dağıtık enerji kaynaklarının neden olduğu faz dengesizliklerini hem teknik hem de stratejik düzeyde analiz etmektir.
- **Disiplinler Arası Yaklaşım:** Araştırma, yalnızca mühendislik temelli değil; politika, planlama ve düzenleyici çerçeve bağlamında da değerlendirilen bütüncül bir analiz sunmaktadır.
- **Varlık Performansı ve Şebeke Güvenliği:** Gerilim saptmaları, harmonikler, ekipman ömrü gibi göstergeler üzerinden şebeke dayanıklılığına yönelik ölçülebilir etkiler değerlendirilmiştir.
- **Politika Yapıcılar için Yol Haritası:** Elde edilen bulgular, sadece teknik teşhis değil; aynı zamanda uygulamaya yönelik çözüm stratejileri ve politika önerileri geliştirmek için kullanılabilir.



Photo by Fré Sonneveld on Unsplash

Elektrikli Araç Şarj Sistemleri

Şarj Tipleri ve Standardizasyon

- **Şarj Yöntemlerinin Sınıflandırılması:** Elektrikli araçlar iletken, kablosuz ve batarya değişimi gibi üç temel şarj yöntemine sahiptir. En yaygın yöntem olan iletken şarj, düşük maliyet ve standart uyumu ile öne çıkar.
- **Şarj Seviyeleri ve Gerilim Aralıkları:** Seviye 1'den Seviye 3'e kadar farklı güç ve gerilim aralıklarına sahip sistemler, kullanım senaryolarına göre ayrılmaktadır. Örneğin, Seviye 3 DC hızlı şarj istasyonları yüksek yatırım gerektirir ancak hızlı enerji aktarımı sağlar.
- **Standartlar ve Uyumlu Donanım:** ISO 15118, IEC 61851 gibi uluslararası standartlar; konnektör tipleri, iletişim protokolleri ve enerji aktarımı için teknik çerçeveler sunar. Uyumlu tasarım, sistem güvenliği ve birlikte çalışabilirlik için kritiktir.
- **Faz Dengesizliğine Etkiler:** Tek fazlı AC şarj noktalarının yaygınlığı, fazlar arası asimetrik yüklemeye neden olarak dengesizlik riskini artırmaktadır. Çift yönlü V2G sistemleri bu etkileri azaltma potansiyeline sahiptir.



Photo by CHUTTERSNAPO on Unsplash

Standardizasyonun Rolü ve Kritik Standartlar

Şebeke Entegrasyonu ve Sistem Uyumu



Donanım ve Protokol Uyumluluğu

ISO 15118, IEC 61851, SAE J1772 gibi uluslararası standartlar şarj cihazı, konnektör tipi, iletişim protokolü ve güç aktarımı gibi bileşenlerde birlikte çalışabilirliği sağlar.



Güç Kalitesi ve Senkronizasyon

IEEE 1547 ve UL 1741 gibi bağlantı standartları, güç kalitesi, voltaj regülasyonu ve arıza durumlarında senkronizasyonu güvence altına alır.



Güvenlik ve Uygunluk

NFPA ve NEC gibi ulusal düzenlemeler kaçak akım, yangın riski ve izolasyon gerekliliklerini tanımlar. Güvenli kurulumlar için bu standartlara uyum zorunludur.



Faz Dengesizliği Açısından Etki

Standartlar yalnızca donanım güvenliği değil, aynı zamanda sistem dengesi için de kritiktir. Uyumsuz tasarımlar faz bazlı dengesizlikleri artırabilir.

Yük Dengesizliği: Kavram, Ölçüm ve Etkiler

Faz Dengesizliklerinin Teknik Temeli

- **Faz Dengesizliğinin Tanımı:** Fazlar arası yük eşitsizlikleri nedeniyle oluşan gerilim sapmaları ve akım asimetrisi, yük dengesizliği olarak tanımlanır ve sistem performansını olumsuz etkiler.
- **Gerilim Dengesizlik Faktörü (VUF):** VUF, sistemdeki gerilim asimetrisini % cinsinden ölçer. IEC 61000-4-30 standardına göre %2'nin üzerindeki değerler kritik kabul edilir.
- **Harmonik Bozulma ve Reaktif Güç:** Dengesiz yüklemeler, harmonik bozulmaları artırır ve reaktif güç tüketimini yükseltir. Bu da verimlilik kayıplarına ve ekipman stresine yol açar.
- **Şebeke Performansına Etkiler:** Yük dengesizlikleri, gerilim kararlılığını bozar, ekipman ömrünü kısaltır, enerji kayıplarını artırır ve koruma sistemlerinin hatalı çalışmasına neden olabilir.



Photo by American Public Power Association on Unsplash

Gerilim, Enerji ve Donanım Üzerindeki Etkiler

Yük Dengesizliklerinin Teknik Sonuçları

- **Gerilim Sapmaları ve Cihaz Performansı:** Dengesizlikler, fazlar arası gerilim farklarını artırarak hassas cihazlarda performans düşüşüne ve hatalı çalışmalara neden olur. Bu durum güç kalitesini doğrudan etkiler.
- **Enerji Kayıpları ve Verimlilik:** Fazlar arası asimetrik akımlar, I^2R kayıplarını artırarak sistem verimliliğini düşürür. %2 üzeri dengesizliklerde enerji kayıpları %6-7 seviyelerine çıkabilir.
- **Ekipman Üzerindeki Termal Etkiler:** Transformatorler ve iletim ekipmanları, dengesizlik sonucu oluşan faz dengesizliğine bağlı olarak daha fazla ısınır, bu da ömürlerini kısaltır ve bakım maliyetlerini artırır.
- **Koruma Sistemleri ve Nötr Akımı:** Dengesiz akımlar, yüksek nötr akımı oluşturarak koruma sistemlerinin yanlış tetiklenmesine ve yangın risklerine yol açabilir.



Photo by American Public Power Association on Unsplash

Nötr Akımı ve Transformatörler

Faz Dengesizliğinin Ekipman Üzerindeki Etkileri



Yüksek Nötr Akımı

Fazlar arasında eşitsiz akım geçişi, nötr iletken üzerinde aşırı yük oluşmasına neden olur. Bu durum, sistemde aşırı ısınma ve izolasyon zayıflamasına yol açar.



Isıl Gerilim ve Yangın Riski

Yüksek nötr akımı, özellikle düşük gerilimli dağıtım sistemlerinde transformatörlerin ısıl gerilimini artırarak yangın riskini büyütür.



Transformatörlerde Manyetik Akı Dengesizliği

Dengesiz yük, transformatör çekirdeklerinde lokal doygunluk ve manyetik akı sapmalarına neden olur. Bu da verimli çalışmayı engeller ve gürültü ile kayıpları artırır.



TEDAŞ Ölçümleriyle Doğrulama

Türkiye'de TEDAŞ tarafından yapılan saha analizleri, bazı OG fiderlerinde nötr akımının nominalin %15'ine ulaştığını ortaya koymuştur.

Koruma Sistemleri ve Güvenilirlik

Dengesizliklerin Röle Koordinasyonuna Etkisi

- **Röle Koordinasyonunun Bozulması:** Koruma şemaları genellikle dengeli işletme koşullarına göre tasarlanır. Faz dengesizlikleri, rölelerin yanlış tetiklenmesine veya gecikmesine neden olabilir.
- **Gereksiz Açmalar ve Arıza Süreleri:** Hatalı koruma işleyişi, sistemin bazı bölgelerinde gereksiz kesintilere veya arıza gideriminde gecikmelere yol açarak güvenilirliği düşürür.
- **Aşırı Koruma vs. Yetersiz Müdahale:** Dengesizlik senaryolarında koruma sistemleri ya gereğinden fazla müdahalede bulunur ya da kritik durumları gözden kaçırabilir, bu da sistem stabilitesini zayıflatır.
- **Sistem Güvenliği Açısından Riskler:** Bozulan koruma koordinasyonu, yangın riski, ekipman arızası ve insan güvenliği açısından ciddi riskler yaratır.



Photo by American Public Power Association on Unsplash

Ekonomik Etkiler ve İşletme Maliyetleri

Faz Dengesizliğinin Finansal Yansımaları

- **Enerji ve İşletme Kayıpları:** Yük dengesizlikleri, I^2R kayıplarını artırarak işletme verimliliğini düşürmekte ve enerji maliyetlerini yükseltmektedir. Özellikle %2 üzeri dengesizliklerde kayıplar %6'ya ulaşabilmektedir.
- **Ekipman Ömrü ve Bakım Giderleri:** Dengesizlik, transformatörlerde ve iletim elemanlarında termal stres yaratarak ömürlerini kısaltır. Bu da sık bakım ve erken ekipman yenileme gerektirir.
- **Şebeke Yatırımlarında Artış:** Güç kalitesini korumak için reaktif güç kompanzasyon sistemleri, adaptif koruma elemanları gibi ek yatırımlar gereklidir. Bu maliyetler CAPEX ve OPEX yükünü artırır.
- **Kentsel Bölgelerde Maliyet Baskısı:** Yoğun nüfuslu alanlarda dengesizliğin etkisi büyüktür. İstanbul ve Ankara gibi kentlerde işletme maliyetlerinde %10-12'ye varan artış raporlanmıştır.



Photo by American Public Power Association on Unsplash

Yenilenebilir Enerji ve Dağıtık Üretim

Faz Dengesizliğine Etkiler ve Dengeleyici Potansiyel

- **Kesintili Üretim Kaynakları:** Güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları, üretim profillerinin öngörülemezliği nedeniyle fazlar arası yük dengesini bozabilir.
- **İnverter Tabanlı Sistemlerin Hassasiyeti:** FV ve rüzgar türbinleri gibi inverterli sistemler, gerilim sapmalarına ve dengesiz yüklere karşı oldukça hassastır. Bu da senkronizasyon sorunlarına yol açabilir.
- **Reaktif Güç Desteği ve Güç Faktörü:** Yetersiz reaktif güç desteği, güç faktörünü düşürerek sistemin dengesini bozar. Bu durum, inverterlerin devre dışı kalmasına neden olabilir.
- **Yerel Enerji Piyasaları ve Faz Kaydırma:** Dinamik faz kaydırma sistemleri ve yerel enerji piyasaları, dengesizliklerin yönetiminde yenilikçi çözümler sunabilir.



Photo by Zbynek Burival on Unsplash

Elektrikli Araçların İkili Rolü

Riskler ve Fırsatlar

- **Koordinasyonsuz Şarjın Riskleri:** Düzensiz zamanlamalı ve tek fazlı şarj işlemleri, sistemde faz dengesizlikleri, harmonikler ve ekipman aşırı yüklenmesi gibi sorunlara yol açabilir.
- **V2G Teknolojileri ile Dengeleme:** Araçtan şebekeye (V2G) sistemleri, EA'ların enerji kaynağı olarak kullanılmasını sağlar. Bu sayede yük dengeleme ve frekans regülasyonu gibi hizmetler sunulabilir.
- **Yük Profilinde Esneklik:** Akıllı şarj algoritmaları, talep eğrilerinin yönetimini mümkün kılarak şebeke üzerindeki ani yüklenmeleri azaltır ve enerji verimliliğini artırır.
- **Yenilenebilir Entegrasyonu ile Uyum:** EA'lar, güneş ve rüzgar gibi kaynaklarla eş zamanlı şarj edilerek üretim fazlalıklarının tüketimini optimize edebilir, böylece sistem kararlılığı artar.



Photo by Vlad Tchompalov on Unsplash

Şarj Altyapısında Zorluklar ve Stratejik Yaklaşımlar

Teknolojik, Düzenleyici ve Mekânsal Engeller

- **Standardizasyon Eksikliği:** Farklı şarj protokolleri (CCS1, CHAdeMO, GB/T) altyapı uyumluluğunu sınırlamakta; ISO 15118 ve IEC 61851 gibi standartların yaygınlaşması kritik önem taşımaktadır.
- **Maliyet ve Fiyatlandırma Sorunları:** Yüksek güçlü istasyonların kurulum maliyetleri ve sabit fiyatlandırma modelleri, yatırım çekiciliğini azaltmakta; dinamik tarifeler ise verimliliği artırabilir.
- **Mekânsal Eşitsizlikler:** Altyapı büyük şehirlerde yoğunlaşırken kırsal bölgelerde erişim düşüktür. Trafik yoğunluğu ve yük tahminine dayalı planlama bu eşitsizliği azaltabilir.
- **Düzenleyici ve İzin Süreçleri:** Yüksek güçlü istasyonlar için gereken uzun izin süreçleri projeleri geciktirmekte; sadeleştirilmiş prosedürler süreci hızlandırabilir.



Photo by Andrew Roberts on Unsplash

Akıllı Şarj, V2G ve Faz Bazlı Yük Yönetimi

Dengesizlikleri Azaltan Yeni Nesil Çözümler

- **Zaman Kontrollü Şarj:** Akıllı şarj algoritmaları, yük yoğunluğunu düşük zaman dilimlerine kaydırarak şebeke üzerindeki ani yüklenmeleri önler ve denge sağlar.
- **Araçtan Şebekeye (V2G) Teknolojisi:** V2G sistemleri sayesinde elektrikli araçlar, ihtiyaç anında enerji sağlayarak frekans regülasyonu ve tepe yük yönetimi görevleri üstlenebilir.
- **Faz Bazlı Yük Tahsisi:** Şarj istasyonlarının faz duyarlı tasarımı, yüklerin fazlara dengeli şekilde dağılmasını sağlayarak VUF oranlarını düşürür.
- **Simülasyon Verileriyle Kanıt:** Türkiye’de yapılan simülasyon çalışmaları, akıllı şarj sistemleriyle VUF oranının %50’ye kadar azaltılabildiğini göstermiştir.



Photo by CHUTTERSNAPE on Unsplash

Politika Önerileri ve Stratejik Planlama

Daha Güçlü ve Esnek Bir Şebeke İçin Yol Haritası

- **Veri Tabanlı Planlama:** Gerçek zamanlı ölçüm ve talep verilerine dayalı planlama, altyapı yatırımlarının verimliliğini artırır ve faz bazlı dengesizlikleri önceden öngörebilir.
- **Düzenleyici Esneklik ve Teşvikler:** Hızlandırılmış izin süreçleri, dinamik fiyatlandırma politikaları ve kamu-özel ortaklıkları, şarj altyapısının yaygınlaşmasını hızlandırır.
- **Standartların Ulusal Ölçekte Yaygınlaştırılması:** ISO 15118, IEC 61851 ve IEEE 1547 gibi standartların zorunlu hâle getirilmesi, sistem güvenliği ve birlikte çalışabilirlik için kritik rol oynar.
- **Kapsayıcı ve Adil Altyapı Dağılımı:** Kırsal ve kentsel alanlarda altyapı eşitsizliğini azaltan bölgesel planlama yaklaşımları, enerjiye erişimde adaleti destekler.



Photo by Quinton Zondervan on Unsplash

Veri Tabanlı Yönetim ve Analitik Yaklaşımlar

Şebeke Dengesizliğini Önlemede Yenilikçi Çözümler

- **Gerçek Zamanlı Veri Analizi:** Enerji tüketimi ve elektrikli araç şarjı ile ilgili verilerin sürekli olarak izlenmesi, dengesizliklerin önceden tespit edilmesine olanak tanır. Bu sayede, şebeke yöneticileri anlık müdahalelerle sorunları çözebilir ve sistemin genel verimliliğini artırabilir.
- **Tahmine Dayalı Modelleme:** Makine öğrenimi ve istatistiksel yöntemler kullanılarak, gelecekteki enerji talepleri ve şarj davranışları tahmin edilebilir. Bu tür modellemeler, şebeke planlamasında daha bilinçli kararlar alınmasına yardımcı olur.
- **Veri Paylaşımı ve İşbirliği:** Farklı paydaşlar arasında veri paylaşımının teşvik edilmesi, daha kapsamlı bir analiz ve daha etkili stratejilerin geliştirilmesine olanak tanır. Bu işbirliği, şebeke dengesizliğini azaltmak için ortak çözümler üretilmesini sağlar.



Photo by Luke Chesser on Unsplash

Sonuç ve Gelecek Perspektifler

Elektrifikasyon Tabanlı Dönüşüm İçin Yol Haritası



Faz Dengesizliklerinin Kritik Rolü

Dengesizlikler sadece teknik değil; ekonomik, operasyonel ve güvenlik açısından da sistemin en zayıf halkalarından biridir.



Akıllı Şarj ve V2G Potansiyeli

EA'ların şebekeye aktif katkısı, dengesizliklerin azaltılmasında yüksek potansiyele sahiptir. V2G ve akıllı şarj uygulamaları %50'ye varan iyileşme sunabilir.



Politika ve Planlamanın Önemi

Teknik çözümlerle sınırlı kalmayan, veriye dayalı, adil ve ölçeklenebilir politika mekanizmaları şebeke dönüşümünün anahtarıdır.



Geleceğe Yönelik Öneriler

Saha verisine dayalı modelleme, faz bazlı planlama, ulusal veri havuzları ve dağıtık algoritmalara odaklanmak sürdürülebilir geçişi mümkün kılar.

Son



Dinlediğiniz İçin Teşekkürler

