

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE GÜVENLİK: SİSTEMİ HIZLI KAPATMA VE MODÜL SEVİYESİNDE GÜÇ ELEKTRONİĞİ ÇÖZÜMLERİNİN TEKNİK İNCELEMESİ

Asuman ERKUL - NTSS Eğitim ve Danışmanlık
Elektrik-Elektronik Yüksek Mühendisi, CFPA-E Türkiye A1 Üyesi
asuman.erkul@ntss.com.tr

1. GİRİŞ

Binaya entegre fotovoltaik (Building Integrated Photovoltaics-BIPV) sistemler, dağıtık enerji üretiminin belkemiğini oluşturuyor. Genellikle çatı tipi olan bu sistemler, yüksek gerilimli DC devreler ve sürekli enerji üretimi nedeniyle yangın güvenliği ve elektriksel emniyet açısından benzersiz riskler barındırıyor.

Güneş paneli yangınlarının çoğu, güneş enerjisi devrelerinde meydana gelen DC ark arızasından kaynaklanır. Güneş paneli kaynaklı yangınların azaltılması için en etkin yöntemlerden biri, PV tesisatında DC ark oluşumunun önlenmesi ve oluşması hâlinde gerilimin hızlı şekilde kesilmesidir.

CFPA-E Guideline No. 37:2025 F PV sistemlerde kayıp önleme için kapsamlı bir çerçeve sunar, özellikle DC ark riskini azaltma, dışarıdan erişilebilir DC kesiciler ve yangına müdahaleyi kolaylaştıracak tasarım ilkelerini öne çıkarıyor

Bu makalede ‘Sistemi Hızlı Kapatma’ (Rapid Shutdown-RSD) ve ‘Modül Seviyesinde Güç Elektroniği’ (Module Level Power Electronics -MLPE) çözümlerinin bu prensiplerle nasıl entegre edildiğini, hangi standartlara göre uygulandığını ve mühendislik tasarımındaki kritik parametrelerini inceliyoruz.

2. PV SİSTEMLERDE ELEKTRİKSEL RİSKLER VE ARIZA MODLARI

Fotovoltaik (PV) sistemler, hem yüksek doğru akım (DC) gerilimleri hem de dağınık ve erişimi zor montaj noktaları nedeniyle kendine özgü elektriksel riskler taşır. Güvenli tasarım ve işletme için bu risklerin tanımlanması ve arıza modlarının analiz edilmesi kritik öneme sahiptir.

2.1. Yüksek Gerilimli DC Devrelerin Riskleri

PV dizileri genellikle 600 VDC (konut) – 1500 VDC (endüstriyel) arası çalışma gerilimlerine sahiptir.

• **DC Ark Riski:** Alternatif akım (AC) devrelerinde ark oluştuğunda, akımın sıfır geçiş noktası doğal bir söndürme mekanizması sağlar. Oysa DC devrelerde böyle bir sıfır geçiş bulunmadığından, ark oluştuğunda plazma kolonunun sürekliliği kesilmez ve ark kendiliğinden sönmez. Bu durum, yüksek sıcaklıkta sürekli enerji yayılımına, izolasyon malzemelerinin termal bozunmasına ve yangın başlatma olasılığının artmasına yol açar. NFPA 70 ve IEC 63027 gibi standartlar, bu nedenle DC ark algılama ve kesme sistemlerinin önemini vurgulamaktadır.

• **Elektroşok Riski:** PV dizilerindeki DC gerilimi, insan vücudunun fizyolojik sınırlarının çok üzerinde olup, temas durumunda ölümcül ventriküler fibrilasyona neden olabilecek akımlar oluşturabilir. Özellikle 120 VDC üzerindeki gerilimlerde, tutma refleksi (let-go current) eşiği aşılır ve kişi devreden ayrılamaz hâle gelir. Bu nedenle EN 50110 ve IEC 61140 gibi standartlarda, DC devrelere dokunma gerilimi sınırları ve çalışma güvenliği prosedürleri tanımlanmıştır.

• **Enerjinin Sürekliliği:** Şebekeden ayrılma (grid disconnection) işlemi, PV modüllerinin enerji üretimini durdurmaz. Paneller, gün ışığına maruz kaldıkları sürece dizi gerilimi üretmeye devam eder. Bu durum, bakım ve acil durum müdahalesi sırasında devrelerin her zaman “enerjili” kabul edilmesini gerektirir. Bu nedenle rapid shutdown ve izole edilebilir DC ayırıcı çözümleri kritik öneme sahiptir.

2.2. Yaygın Elektriksel Arıza Modları

Yaygın elektriksel arıza modları aşağıda belirtilmiştir.

Kablo ve Bağlantı Arızaları

- **İzolasyon Hasarı:** UV ışıınımı, kemirgen faaliyetleri veya mekanik zorlanma nedeniyle kablo kılıflarının bütünlüğü bozulabilir. Bu durum kaçak akıma, toprak arızasına ve potansiyel elektriksel ark oluşumuna zemin hazırlar. EN 50618 standardı, PV kabloları için UV dayanımı, ozon direnci ve termal stabilite gerekliliklerini tanımlar.
- **Konnektör Uyum Sorunları:** Farklı üreticilerin MC4 konnektörlerinin uygunsuz şekilde eşleştirilmesi, temas direncini artırarak lokal ısınmaya ve DC ark başlatma riskine neden olur. IEC 62852 standardı bu konnektörler için tip testlerini ve uyumluluk gerekliliklerini belirler.
- **Yanlış Sıkma Torku:** Klemens bağlantılarının yeterli torkta sıkılmaması, artan geçiş direncine, termal runaway'e ve bağlantı noktasında yangın riskine yol açar. Bu nedenle üretici tork değerlerine uyulması ve periyodik tork kontrolü kritik önemdedir.

Modül Kaynaklı Arızalar

- **Bypass Diyot Arızası:** Diyotun kısa devre konumunda kalması, ilgili hücre grubunun devre dışı kalmasına; açık devre kalması ise hücre üzerinde aşırı ısınma (hot spot) oluşmasına neden olur. Hot spot'lar lokal delaminasyon ve cam kırılmasıyla sonuçlanabilir.
- **Delaminasyon ve Nem Girişi:** EVA (Etilen Vinil Asetat) tabakasının zamanla bozulması ve arka tabaka (backsheet) bütünlüğünün zayıflaması, modülün izolasyon direncini düşürerek kaçak akım riskini artırır. Bu durum IEC 61215 testlerinde tespit edilebilen kritik bir arıza modudur.

İnverter ve Elektronik Arızalar

- **GBT/MOSFET Kısa Devresi:** IGBT (insulated-gate bipolar transistor) ve MOSFET (Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör)'ler güç elektroniği devrelerinde yüksek akım ve gerilimi anahtarlama elemanları genellikle kullanılırlar. Bu elemanların kısa devre olmaları durumunda kablolarda aşırı akım oluşur, sigortaların atmasına sebep olur.

- **Kontrol Devresi Hataları:** MPPT algoritması yanlış çalışarak aşırı akım çekebilir. Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT), değişen güneş ışıını, sıcaklık ve elektrik yükü gibi değişken koşullar altında PV güneş panellerinin maksimum güç noktasında veya buna yakın bir noktada çalışmasını sağlamak için solar inverterlerde uygulanan bir algoritmadır.

- **DC/DC Boost Katı Arızası:** DC gerilim yükselir ve inverter DC girişini aşırı zorlar. DC/DC invertere, bir DC gerilimi farklı bir DC gerilime dönüştüren DC-DC dönüştürücü denir. Boost dönüştürücü, çıkış voltajının giriş voltajından büyük olduğu DC-DC anahtarlama dönüştürücülerdir. Ayrıca step up converter (adım dönüştürücü) olarak da adlandırılırlar.

Dış Etkenler

- **Yıldırım ve Aşırı Gerilim:** EN 62305'e uygun paratoner ve topraklama entegrasyonu yapılmamış sistemlerde, yıldırım indüklenmiş aşırı gerilim darbeleri modül bağlantı kutularına ve inverter girişlerine ciddi hasar verebilir.
- **Kısa Devre veya Topraklama Hatası:** IEC 62446-1 standardına göre yapılmayan izolasyon testi, gizli toprak kaçaklarının tespit edilememesine ve yangın riskinin artmasına neden olur.

2.3. Risk Azaltma Önlemleri

Fotovoltaik sistemlerde elektriksel yangın riski ve can güvenliği tehlikelerini minimize etmek için tasarım, montaj ve işletme aşamalarında çok katmanlı bir güvenlik yaklaşımı benimsenmelidir. Aşağıda, güncel standartlara dayalı başlıca önleyici tedbirler özetlenmektedir:

1. Kısa ve Düzgün DC Güzergâhı:

DC kablolar mümkün olan en kısa hat boyunca, mekanik hasara ve yangın yayılımına karşı dayanıklı koruyucu kanallar içerisinde taşınmalıdır. EN 50618 standardı, PV kablolarında UV dayanımı, ısıya karşı direnç ve düşük duman yoğunluğu gibi kritik özellikleri tanımlar. Ayrıca, kablo güzergâhlarının birbirinden yeterli mesafede ve yangın kompartımanlarının bütünlüğünü bozmayacak şekilde planlanması önerilir.

2. Yalıtım Direnci İzleme:

Toprak kaçak akımlarının erken tespiti için sü-

rekli yalıtım direnci izleme sistemleri (IMD – Insulation Monitoring Device) kullanılmalıdır. Riso ölçümleri, IEC 62446-1 standardına göre düzenli aralıklarla yapılmalı ve izolasyon direnci kritik seviyenin altına düştüğünde sistem otomatik olarak devreden çıkarılmalıdır. Bu yaklaşım, izolasyon hatalarından kaynaklanan potansiyel ark ve yangın risklerini proaktif şekilde önler.

3. Rapid Shutdown (RSD) ve MLPE Uygulamaları:

Yangın, acil durum veya bakım çalışması gibi durumlarda PV dizi geriliminin hızlı şekilde güvenli seviyeye (NEC 690.12'ye göre ≤ 30 VDC) indirilmesi hayati önem taşır. Modül seviyesi güç elektroniği (MLPE) çözümleri – örneğin DC optimizörler veya mikroinverterler – dizi gerilimini sıfırlayarak hem acil müdahale ekiplerinin güvenliğini artırır hem de yangın yayılım riskini azaltır.

4. Termal Görüntüleme ile Periyodik Kontrol:

Konnektör, klemens ve kablo ek noktalarında anormal sıcaklık artışlarının tespiti için yılda en az bir kez termal kamera taraması yapılmalıdır. 65 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar, yüksek temas direnci veya gevşek bağlantı gibi yangın riski taşıyan problemlere işaret eder ve derhal düzeltilmelidir.

5. Koruma ve Ayırma Elemanlarının Uygun Seçimi:

String sigortaları, DC ayırıcılar, aşırı gerilim koruma cihazları (SPD) ve artık akım koruma rölelerinin (RCD) sistem konfigürasyonuna ve nominal akım değerlerine uygun seçilmesi kritik öneme sahiptir. IEC 60364-7-712 ve IEC 61643 serisi standartları, PV uygulamaları için SPD seçimi ve koordinasyon kriterlerini tanımlar. Bu koruma elemanlarının periyodik olarak test edilmesi ve değiştirilmesi, sistemin ömür boyu güvenilirliğini sağlar.

3. RAPID SHUTDOWN (RSD) SİSTEMLERİ

Rapid Shutdown (RSD), acil durumlarda – yangın, bakım çalışmaları veya kurtarma operasyonları – PV dizilerinde oluşan tehlikeli doğru akım (DC) gerilimini 30 saniye içerisinde güvenli seviyeye düşürmeyi sağlayan elektronik kontrol ve anahtarlama sistemidir. Bu sistem, özellikle itfaiye personeli ve bakım ekiplerinin yüksek gerilim altında maruz kalma riskini minimize etmek

için tasarlanmıştır. NEC 2017 Madde 690.12'ye göre güvenli gerilim seviyesi, modül çıkışında ≤ 30 VDC olacak şekilde tanımlanmıştır.

Aktivasyon Yöntemleri:

RSD sistemleri, farklı senaryolarda otomatik veya manuel olarak devreye girebilir. Başlıca aktivasyon yöntemleri:

- **Manuel Acil Durdurma Anahtarı:** Operatör veya acil durum personeli tarafından devreye alınır; tesis girişinde veya erişilebilir bir noktada konumlandırılır.
- **Şebeke Enerjisi Kaybı Algılama:** AC tarafında enerjinin kesilmesi durumunda otomatik tetikleme yaparak tüm DC dizilerini güvenli seviyeye indirir.
- **Uzaktan Müdahale / İtfaiye Kumandası:** Yangın müdahale ekiplerinin sahada fiziksel erişime gerek kalmadan dizi gerilimini düşürmesini sağlar.

RSD sistemi topoloji seçenekleri Tablo1.1'de görülmektedir.

Tablo 1.1. RSD Sistemi Topoloji Seçenekleri.

Topoloji	Çözüm	Avantajları	Dezavantajları
İnverter Tabanlı RSD	Merkezi inverter DC girişinde anahtarlama	Düşük maliyet, mevcut inverter altyapısına kolay entegrasyon, basit tasarım	Modül çıkışında gerilim sıfırlanmaz; uzun dizi hatlarında kalan gerilim riski devam eder
String Seviye RSD	Her string başına DC kontaktör veya elektronik kesici	Dizi bazında hızlı enerji boşaltma, modül çıkış gerilimi kısmen düşer	Çok sayıda string kullanılan büyük sistemlerde kablolama ve montaj karmaşık hale gelir
Modül Seviye RSD (MLPE)	Modül başına elektronik anahtarlama (optimizör, mikroinverter)	Maksimum güvenlik; her modül izole edilir, bakım ve yangın müdahalesinde sıfır risk	Yüksek ilk yatırım maliyeti, elektronik bileşen sayısının artması nedeniyle arıza olasılığı daha yüksek

İnverter tabanlı çözümler, küçük ölçekli veya düşük riskli uygulamalarda yeterli olabilirken; büyük ölçekli, çok katmanlı bina uygulamaları veya yangın güvenliği öncelikli projelerde modül seviyesi RSD (MLPE) tercih edilmektedir. Bu yaklaşım, özellikle çok katlı binalarda yangın söndürme sırasında çatıya müdahale eden personelin elektrik çarpması riskini ortadan kaldırır.

4. MODÜL SEVİYESİNDE GÜÇ ELEKTRONİĞİ

MLPE Modül seviyesinde güç elektroniği (Module Level Power Electronics) demektir.

MLPE ÇÖZÜM TİPLERİ

- **DC-DC Optimizörler:** Her bir PV modülünün çıkışını bağımsız olarak izler ve Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) yapar. Modern optimizörler, entegre hızlı kapatma (rapid shutdown) özelliği ile modül çıkışını birkaç volt seviyesine kadar düşürerek acil durumlarda gerilim riskini ortadan kaldırır.
- **Mikroinverterler:** Modül seviyesinde DC-AC dönüşümü gerçekleştirir. Bu yaklaşım, dizinin DC gerilimini tamamen ortadan kaldırdığı için yangın güvenliği açısından en yüksek koruma düzeyini sağlar. Ayrıca, merkezi inverter arızasından etkilenmeyen dağıtık bir sistem topolojisi sunar.

MLPE TEKNİK PARAMETRELER

- **MTBF (Mean Time Between Failures):** Modül başına elektronik bileşen eklenmesi, sistemde potansiyel arıza noktalarının artmasına neden olur. Bu nedenle cihazların UL 1741 ve IEC 62109 sertifikalı olması, yüksek MTBF değerine sahip güvenilir ürünlerin tercih edilmesi önerilir.
- **EMC Uyumluluğu:** MLPE cihazlarının elektromanyetik emisyonları, şebekeye bağlı diğer sistemleri etkilemeyecek şekilde IEC 61000-6-2/4 standartlarına göre test edilmelidir.
- **Enerji Verimliliği:** İlave seri kayıplar tipik olarak %0,5-1 seviyesinde güç kaybına yol açsa da, gölgelenme ve dizi uyumsuzluğu kaynaklı kayıpların azaltılması sayesinde yıllık enerji üretiminde net pozitif kazanç elde edilir.

TASARIM VE UYGULAMA ÖNERİLERİ

1. Planlama:

o Dizi konfigürasyonu, RSD ve MLPE cihaz sayısı, tek hat şeması ile modellenmeli.

o Yangın duvarlarından geçen DC kablolar EN 61386 uyumlu alev iletmeyen borular içinde olmalı.

2. Montaj:

o RSD kontrol hattı (genelde 2 telli yol) ayrı boru içinde çekilmeli, sinyal bütünlüğü test edilmeli.

o İnverterler, mümkünse dış mekâna veya ayrı yangın kompartımanına kurulmalı.

3. Test ve Devreye Alma:

o Yalıtım direnci ölçümü (IEC 62446-1) ve RSD fonksiyon testi yapılmalı.

o Termal kamera ile konnektör sıcaklıkları izlenmeli (<65 °C normal).

4. İşletme:

o Yıllık bakımda RSD sisteminin tetikleme testi yapılmalı.

o SCADA veya uzaktan izleme sistemine RSD olay kaydı entegrasyonu önerilir.

5. YANGIN MÜDAHALESİ PERSPEKTİFİ

CFPA-E rehberleri ve uluslararası en iyi uygulamalara göre, PV sistemlerinde yangın güvenliği tasarımı yalnızca elektriksel risklerin azaltılmasıyla sınırlı olmamalıdır.

• **Erişilebilirlik:** RSD butonları bina girişinde, kolay ulaşılabilir bir yükseklikte ve açık şekilde etiketlenmiş olmalıdır.

• **Yangın Planı Entegrasyonu:** PV dizi planları, RSD kablolama şeması ve kesici noktaları yangın planına işlenmeli ve yerel itfaiye ekipleriyle paylaşılmalıdır.

• **Çatı Düzeni:** Çatıda en az 2,5 m genişliğinde yangın geçiş koridoru bırakılmalı, bu sayede hem yangına müdahale hızlanır hem de personelin elektrik çarpması riski en aza iner.

6. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Rapid Shutdown (RSD) ve Modül Seviyesi Güç Elektroniği (MLPE) çözümleri, yalnızca elektrik-

sel güvenliği sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda enerji optimizasyonu, gölgeleme etkilerinin azaltılması ve sistem performansının gerçek zamanlı izlenmesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çözümler, saha işletmecilerine gelişmiş veri toplama (monitoring) imkânı sağlayarak arıza tespiti ve önleyici bakım süreçlerini hızlandırır, böylece işletme sürekliliğini artırır.

Uluslararası standartlar – IEC 62930 (PV kabloları için tasarım ve test), EN 50618 (DC kablo güvenlik gerekleri) ve NEC 690.12 (Rapid Shutdown gereklilikleri) – PV tesislerinin hem elektriksel emniyetini hem de acil durum müdahale kolaylığını düzenlemektedir. Türkiye’de bu standartların giderek daha fazla referans alınması, özellikle çok katlı binalarda ve şehir içi uygulamalarda RSD ve MLPE kullanımının yakın gelecekte zorunlu hale geleceğini göstermektedir.

Elektrik ve elektronik mühendisleri açısından, bu sistemlerin doğru tasarlanması, uygun kablolama teknikleriyle uygulanması (ör. EN 50618 uyumlu kablo ve alev iletmeyen boru kullanımı) ve periyodik fonksiyon testleriyle desteklenmesi, sürdürülebilir ve yangın güvenliği yüksek bir güneş enerjisi altyapısının temelini oluşturur. Bu bütüncül yaklaşım, yalnızca regülasyon uyumluluğunu sağlamakla kalmaz; aynı zamanda yangın riskini minimize ederek PV sistemlerinin uzun vadeli güvenilirliğini garanti altına alır.

Kaynaklar; <https://cfpa-e.eu/category-guidelines/fire-prevention-and-protection/>

- 1) <https://www.wbdg.org/resources/building-integrated-photovoltaics-bipv>
- 2) <https://www.solarreviews.com/blog/solar-rapid-shutdown>
- 3) <https://sinovoltaics.com/learning-center/materials/ethylene-vinyl-acetate-eva-film-composition-and-application/>
- 4) <https://tr.wikipedia.org/wiki/IGBT>
- 5) <https://www.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>
- 6) <https://turkmuhendis.net/donanim/boost-converter/>
- 7) <https://eureka.patsnap.com/article/ul-1741-vs-iec-62109-global-inverter-safety-standards-compared>
- 8) <https://cfpa-e.eu/>
- 9) [ECOFOOT2_UL3741-INSTALLATION-GUIDE_20230711.pdf](https://www.ecofoot2.com/ul3741-installation-guide-20230711.pdf)

29 EKİM CUMHURİYET BAYRAMI’NA ÖZEL KARMA RESİM SERGİSİ DÜZENLENDİ

Ankara Rüzgârı Kültür Sanat ve Yaşamı Destekleme Derneği ve EMO Ankara Şubesi işbirliği ile “CUMHURİYET YOLUNDA” başlıklı 29 Ekim Özel Karma Resim Sergisi, EMO Ankara Şubesi web sayfasında üyelerimiz ve ilgilileri ile buluştu, Küratörlüğünü Elektrik Mühendisi üyemiz Hatice Erdi’nin üstlendiği sergi web sayfamızdan sanal olarak gezilebilir.



Sanal Sergiyi Gezmek İçin TIKLAYINIZ.