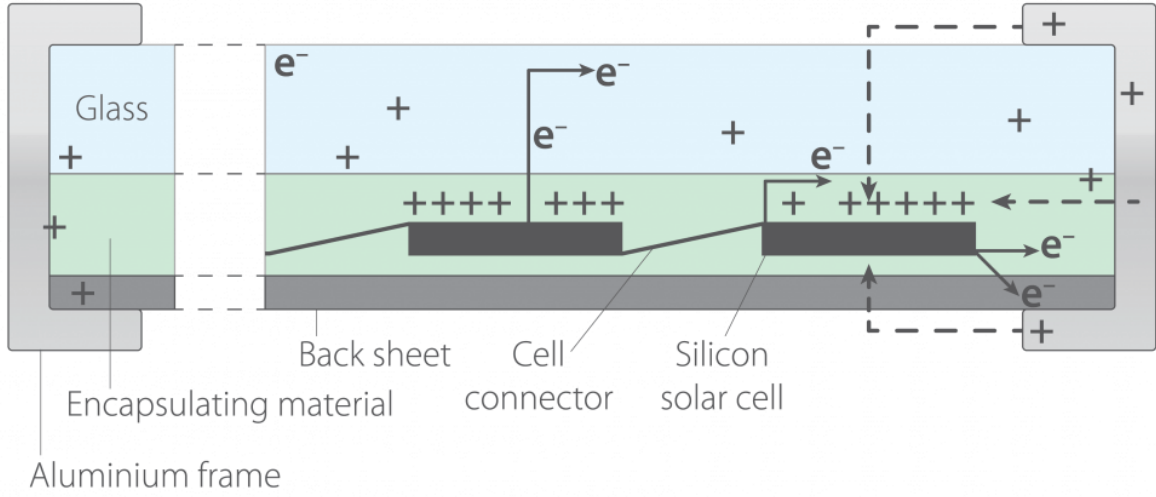




FOTOVOLTAİK MODÜLLERDE PID ETKİSİ

ERDEM MERİÇ



2025

KOCAELİ

FOTOVOLTAİK MODÜLLERDE PID ETKİLERİ

PID EFFECTS ON PHOTOVOLTAIC MODULES



Erdem MERİÇ

KOCAELİ-TÜRKİYE

Enerji Danışmanlığı Hizmetleri / Renewable Energy Consultancy
2025

ÖZET

“Potential Induced Degradation” kelimelerinin baş harfleri ile tanımlanan ve fotovoltaik güneş panellerinde orta-uzun vadede güç kayıplarına sebep olan bir bozulma yapısı veya süreci ile karşılaşılmaktadır. Türkçede “Potansiyel Kaynaklı Bozulma” olarak tanımlanabilecek bu olumsuzluk tipi, uzun vadede pv modüllerde %70’ e varan güç kayıplarına sebep olabilmektedir.

EVA kapsülündeki delaminasyon veya renk farklılaşmalarında olduğu gibi PID bozulmasını çıplak gözle fark edebilmek mümkün olmamaktadır. Bu yazıda, PID hatasının oluşma mekanizması, etkilerinin azaltılması için neler yapılması gerektiği konularına değinilecektir. PID hatası, laboratuvar deney sonuçlarına göre kesin çıkarımlar yapılabilecek bir oluşum mekanizmasına sahip olmayıp fenomenal bir bozulma türüdür. PV modüllerin yaşlanmasının bir göstergesi olarak ortaya çıktığı söylenebilir. Her ne kadar uzun vadede ortaya çıktığı görülen bir bozulma şekli olsa da; ikinci kalite panel ve ekipman seçimi, tekniğe uygun olmayan montaj ve işçilik hataları nedeniyle santralin devreye alınmasını takip eden birkaç hafta içinde PID bozulma süreci başlayabilmektedir.

SUMMARY

A degradation structure or process, defined by the initials of "Potential Induced Degradation," is encountered in photovoltaic solar panels, causing medium- to long-term power losses. This type of degradation, known as "Potential Induced Degradation" in Turkish, can cause power losses of up to 70% in PV modules in the long term.

Unlike delamination or discoloration in EVA capsules, PID degradation is not detectable with the naked eye. This article will discuss the mechanism of PID error formation and what can be done to mitigate its effects. PID error is a phenomenal type of degradation, lacking a definitive mechanism that can be deduced based on laboratory test results. It can be said to occur as an indicator of aging in PV modules. Although it is a deterioration pattern that appears to occur over the long term, PID degradation can begin within a few weeks of plant commissioning due to the selection of substandard panels and equipment, improper installation, and workmanship errors.

PID – POTENTIAL INDUCED DEGRADATION

“Potential Induced Degradation” kelimelerinin baş harfleri ile tanımlanan ve fotovoltaik güneş panellerinde orta-uzun vadede güç kayıplarına sebep olan bir bozulma yapısı veya süreci ile karşılaşılmaktadır. Türkçede “Potansiyel Kaynaklı Bozulma” olarak tanımlanabilecek bu olumsuzluk tipi, uzun vadede pv modüllerde %70’ e varan güç kayıplarına sebep olabilmektedir. EVA kapsülündeki delaminasyon veya renk farklılaşmalarında olduğu gibi PID bozulmasını çıplak gözle fark edebilmek mümkün olmamaktadır. Bu yazıda, PID hatasının oluşma mekanizması, etkilerinin azaltılması için neler yapılması gerektiği konularına değinilecektir. PID hatası, laboratuvar deney sonuçlarına göre kesin çıkarımlar yapılabilecek bir oluşum mekanizmasına sahip olmayıp fenomenal bir bozulma türüdür. PV modüllerin yaşlanması bir göstergesi olarak ortaya çıktığı söylenebilir. Her ne kadar uzun vadede ortaya çıktığı görülen bir bozulma şekli olsa da; ikinci kalite panel ve ekipman seçimi, tekniğe uygun olmayan montaj ve işçilik hataları nedeniyle santralin devreye alınmasını takip eden birkaç hafta içinde PID bozulma süreci başlayabilmektedir.

TARİHÇE

SunPower firmasının ilk nesil monokristal yüksek performans modüllerinde “polarizasyon” olarak belirtilen bozunma mekanizması 2005 yılında tartışılmaya başlanmış ve katkılı yarıiletken mimarisine sahip pv hücrelerinde potansiyel kaynaklı bozulmalar konu edilmiştir. p- tipi veya n-tipi panel mimarilerinin PID etkisine maruz kalma durumları birbiriyle karşılaştırılmış ve PID’ den en az etkilenen yarı iletken hücre mimarisi araştırma konusu olmuştur. 2007-2008 yıllarında birçok teknik literatür pv hücre ve modüllerindeki elektrokimyasal etkileri yayınlarında konu edinmiştir.

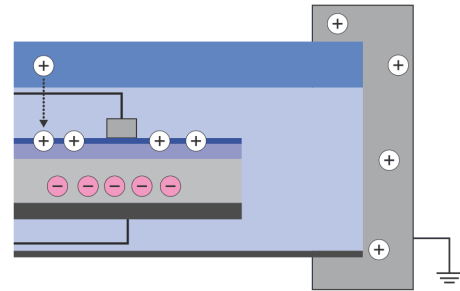
PID - “Potansiyel Kaynaklı Bozulma” terim olarak ilk kez 2010 yılında S.PINGEL ve ekibi tarafından yayınlanan bir makalede tanımlanarak literatürde yer bulmuştur. PID hususu, PV modül hücreleri ile toprak arasındaki voltaj potansiyelinden kaynaklanan bir bozulma şekli olarak tanıtılmıştır.

Bu alandaki araştırmalara Jet Propulsion Laboratuvarı öncülük etmiş ve saflaştırılmış kristal yapısıyla amorf silikondan yapılmış pv modüllerdeki elektrokimyasal bozunma durumuna odaklanılmıştır.

NASIL OLUŞUR?

PID (Potansiyel Kaynaklı Bozulma), fotovoltaik hücrelerin yarıiletken malzeme yapısındaki yük taşıyıcısı elektronların bulunduğu potansiyel enerji noktasından yüksek potansiyel farkı nedeniyle kaçak akımlarla istenmeyen farklı bir potansiyel noktasına hareket etmesidir.

Serbest taşıyıcı elektronlar veya iyonlaşmaya bağlı ortaya çıkan yük taşıyıcılarının bu yer değiştirme hareketi hücre performansını azaltan istenmeyen bir durumdur.

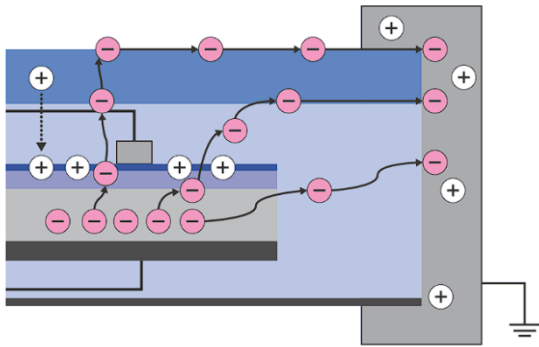


Şekil-1

Özellikle endüstriyel güneş enerji santralleri ve arazi kurulumlarında giderek daha fazla sayıda solar panelin seri olarak bağlanması nedeniyle yükselen dizi gerilimleri hücrelerin toprağa göre negatif potansiyellere maruz kalmasına sebep olmaktadır.

Bu durum modüllerin yüksek performans kayıplarına sebep olan yüksek negatif polarizasyona bağlı PID bozunumudur.

Faraday'ın indüksiyon kanunundan hareketle izah olunan girdap (eddy) akımlarının etkisiyle, pv hücreler ile toprağa bağlı panel alüminyum çerçevesi arasında yük taşınması durumu polarizasyonun bir sonucudur. Bu etki sonucunda pv modüllerin yarı iletken mimarisinde üretilen negatif yüklerin ekseriyetle toprak potansiyelinde bulunan panel metal aksamına doğru hareket etmesiyle oluşmaktadır.



Şekil-2

Seri bağlı modül sayısının artması hücreler üzerindeki elektro motor kuvvetin artmasına, hücre sıcaklığının ve ortam neminin yüksek olması ise yük taşıyıcıları için daha düşük dirençli bir yol oluşumuna ve neticede PID hatasının yaşanmasına sebep olacaktır.

PV modüllerin topraklanmış kenar çerçeveleri ile modül ön camı da temas halindedir. Modül camını pratikte her ne kadar yalıtkan olarak kabul etsek bile, ön camda biriken kirlenme ve nemlilik fotovoltaiik hücreler ile modül cam yüzeyi arasında potansiyel farkını meydana getirecektir. Oluşan bu yüksek elektrik potansiyel farkı iyonlaşma ve dolayısıyla elektronların yer değiştirmesine, başka bir deyişle sızıntı akımlarına sebep olacaktır.

Özetle; PID,

Fotovoltaiik modüllerde fenomenal kaçak akımlara bağlı olarak oluşan potansiyel fark kaynaklı performans bozulması ve performans kaybıdır.

PID bozulması genellikle toprak potansiyeline göre negatif voltaja sahip pv modüllerinde daha fazla görülmektedir.

PID oluşumunu başlatan veya hızlandıran faktörler:

- Uzun dizi bağlantıları (Yüksek dizi voltajı)
- Yüksek sıcaklık
- Yüksek nemlilik
- Hasarlı panel çerçeveleri
- Uzun yıllar hizmet vermiş modüller
- Bakımsızlık ve kirlenme
- İkinci sınıf modül ve ekipmanlar
- Uygunsuz montaj

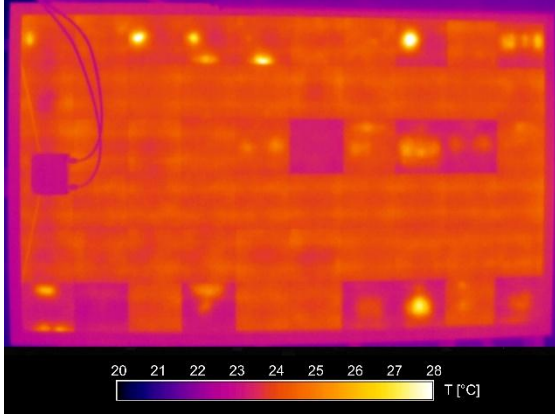
PID BOZULMASI NASIL TESPİT EDİLİR?

Potansiyel kaynaklı bozulmanın çıplak gözle tespit edilmesi mümkün değildir. PID etkisi altında olan bir panelde herhangi bir görsel farklılaşma olmamaktadır. PID bozulması olan bir modülün I-V karakteristik eğrisinde değişim olacağından I-V eğrileri kontrol edilerek tespit yoluna gidilebilir. Bunun için I-V eğrisini ölçen bir cihaz yardımıyla görüntülenen grafik, üretici firmanın referans I-V eğrisiyle karşılaştırılarak değerlendirme yapılabilir.

Almanya' nın lider kuruluşu **Fraunhofer CSP** firmasındaki araştırmacıların 2013 yılında geliştirdikleri hızlı PID kontrol metodu ile kapsüllenmiş hücreler tekil olarak PID testine tabi tutulurlar. Böylece, PID etkisi daha küçük bir alanda tetiklenebilir ve olası bozulma gerçek zamanlı olarak ölçülebilir. Ayrıca, farklı polimer kapsülleme filmlerinin veya camlarının güneş modüllerinin PID direnci üzerindeki etkisi de test edilebilir.

Böylece her bir modül için iklimlendirilmiş geniş hacimli odalara gerek kalmamakta ve dolayısıyla yüksek test maliyetlerinin önüne geçilmektedir.

IR termal görüntüleme ve elektrolüminesans testleri de PID' nin tespitinde kullanılan yöntemlerdir.



Şekil-3

KAÇ ÇEŞİT PID BOZUNUMU VARDIR?

Bozulmanın kaynaklandığı sebeplere göre 3 farklı PID mekanizması ortaya çıkmaktadır.

PID-s / Şönt Tipi PID Bozunumu

PV hücreleri meydana getiren yarı iletken mimarisinde pn eklemleri arasındaki jonksiyonda meydana gelen kısa devrelerdir. Buna "fotovoltaik şönt" denilebilir. Bilindiği üzere şönt kavramı olarak, elektrik akımının farklı bir elektriksel yol üzerinden aktarılmasıdır. Ancak fotovoltaik şönt, pn eklemesinde meydana gelir ve istenmeyen PID hatasına sebep olur.

PID-p / Polarizasyona Bağlı PID Bozunumu

Yüksek dizi geriliminin neden olduğu polarizasyon etkisiyle yüklerin istenmeyen hareketine bağlı PID bozunumudur. Şekil-2 de gösterilen durum PID-p' ye bir örnektir.

PID-c / Korozif PID Bozunumu

EVA katmanlarının lokal olarak yıpranması, montaj esnasında panel çerçevesinin zedelenmesi ve yarı iletken katmanların elektrokimyasal olarak korozyona maruz kalması sonucu ortaya çıkan PID bozunum çeşididir.

PID HATA OLUŞUMUNU AZALTMAYA YÖNELİK REFERANS STANDART NEDİR?

PID Free olarak imalat bandından çıkan bir pv modül için referans standart, IEC TS 62804-1:2015 "Fotovoltaik (PV) Modülleri – Potansiyel Kaynaklı Bozunmayı (PID) Tespit Etmek İçin Yöntemler" dir. Panel üreticilerinin ürünleri hakkında "PID FREE" (PID İçermeyen) sertifikasyonuna sahip olabilmeleri için bazı üretim süreçlerini optimize etmeleri ve modül bileşiminde kullanılan birçok yarı mamulü çok dikkatli seçmeleri gerekmektedir. PID bozulması her ne kadar ortam şartlarına bağlı ortaya çıkan bir hata türü olarak gözükse de PID oluşumunda kalitesiz panel bileşenlerinin olumsuz etkisi göz ardı edilemez.

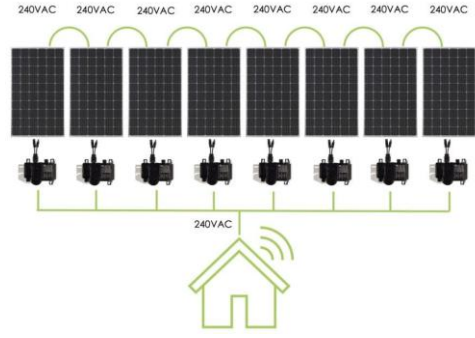
PID testleri yapılırken, fotovoltaik hücreler bu hata olgusunun meydana geldiği ortam koşullarına maruz bırakılırlar. PID testlerinde modül cam yüzeyi ve hücre arasında yüksek elektrik potansiyeli oluşturularak aşağıda belirtilen ortam koşulları hazırlanmaktadır:

- 1- 60 °C (140 °F) ortam sıcaklığı,
- 2- %85 nemlilik,
- 3- 1000 V negatif yönlü potansiyel farkı.

Bu test 96 saat süreyle uygulanmakta olup, hücrelerde %5' ten daha düşük güç kaybı gözlenmemesi temel kriterdir.

PID testleri panel üreticileri tarafından dahili olarak yapılabildiği gibi, harici test laboratuvarlarında da testler yapılmakta ve sonuçlar resmi olarak raporlanmaktadır.

Panel üreticileri, kaliteli yarı mamul tercih etmeleri ve üretim proseslerini iyileştirmeleri nedeniyle standartta belirtilen %5 performans kaybindan daha düşük değerlere erişmeye başlamışlardır. Tabi ki bu iyileşmenin AR-GE, kalite ve dahili laboratuvar ölçümlerine yatırım yapan pv modül imalatçıları kapsayacağı aşikardır. PID içermeyen yüksek performanslı PV modüllerinde, PID' ye bağlı %1 den daha düşük performans kayıpları görülebilmektedir.



Şekil-5

Mikro İnverterli Dizi Bağlantısı

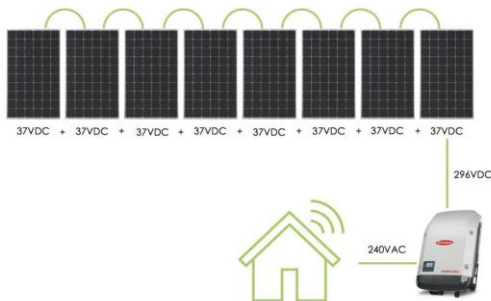
PID BOZULMASINI ÖNLEMEK VEYA TERSİNE ÇEVİRMEK MÜMKÜN MÜ?

1- Kaliteli Güneş Panellerini Tercih Etmek:

Üretimi esnasında en yüksek kaliteli malzemelerin kullanıldığı, IEC TS 62804-1:2015 standartına uygun imal edilmiş, iyonlaşmanın yaşanmayacağı, nemliliğin etkisini bertaraf eden imalat süreçleri olan bir üreticinin PID-free adı altında piyasaya sürdüğü panelleri kullanmak PID ile mücadelede ilk adımdır.

2- Mikro İnverter Kullanımı:

Mikro inverter kullanılan fotovoltaik sistemlerde yüksek dizi gerilimleri meydana gelmeyeceğinden, her bir panel veya panel grubu mikro inverter üzerinden AC hatta bağlanacağından mikro inverterli kurulumlarda PID-p etkisi yaşanmayacaktır.



Şekil-4

Klasik Dizi İnverter Bağlantısı

Klasik dizi inverter bağlantısında her bir panelin DC gerilimi toplanarak dizi gerilimi oluşurken, mikro inverterli bağlantıda her bir panel müstakil olarak bir mikro inverter ile 230 V AC gerilim çıkışı vermekte ve diğer panellerin çıkışları da ortak AC barada birleşmektedir. Mikro inverterler çalışma yapıları gereği birbirleriyle sıfır geçiş noktasında senkron olabilmektedirler.

3- Trafolu İnverterlerin Kullanımı ve PV+ veya PV- Kutuplarından Birinin Topraklanması:

Dahili olarak bir trafoya sahip inverter, fotovoltaik dizi kutuplarından birinin topraklanmasını sağlayan bir topoloji meydana getirir. Ancak hangi kutbun topraklanması gerektiği panel üreticisi firma ile netleştirilmelidir. P- tipi panel ve n-tipi paneller için topraklanacak kutbun negatif veya pozitif olması önem arz edecektir.

4- Anti-PID Cihazı Kullanmak:

Anti-PID cihazları esasen stringe ters yönde bir gerilim uygulama prensibine göre çalışmaktadır. Güneş ışığı varlığında meydana gelen polarizasyona zıt yönlü bir gerilimi gece saatlerinde pv dizisine uygulayarak PID etkisi tersine çevrilmeye çalışılmaktadır. Bunu yapan Anti-PID cihazları olduğu gibi, bu özelliğe sahip inverterler de üretilmeye başlanmıştır.

İnverter üreticisi birçok firmanın kendi sistemleriyle eş zamanlı çalışabilecek Anti-PID cihazları mevcuttur.

Yazar:

Erdem MERİÇ

Elektrik Elektronik Mühendisi
Fotovoltaic Energy Engineering Consultant
KOCAELİ-TÜRKİYE
18.08.2025

KAYNAKÇA

- Dr. rer. nat. Volker Naumann
Group Manager »Defect Diagnostics«
| Group »Materials Diagnostics for H2 Technologies«
Fraunhofer Center for Silicon
Photovoltaics CSP
Otto-Eißfeldt-Straße 12
06120 Halle (Saale), Germany
- K. Sporleder, V. Naumann, J. Bauer, S. Richter, A. Hähnel, S. Großer, M. Turek, C. Hagendorf, Local corrosion of silicon as root cause for potential induced degradation at the rear side of bifacial PERC solar cells. *physica status solidi (RRL)*–Rapid Research Letters. (2019), DOI 10.1002/pssr.201900163
- K. Sporleder, V. Naumann, J. Bauer, S. Richter, A. Hähnel, S. Großer, M. Turek, C. Hagendorf, Root cause analysis on corrosive potential-induced degradation effects at the rear side of bifacial silicon PERC solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 201 (2019) 110062, ISSN 0927-0248, doi 10.1016/j.solmat.2019.110062
- K. Sporleder, V. Naumann, J. Bauer, S. Richter, A. Hähnel, S. Großer, M. Turek, C. Hagendorf, Microstructural Analysis of Local Silicon Corrosion of Bifacial Solar Cells as Root Cause of Potential-Induced Degradation at the Rear Side. *physica status solidi (a)* (2019), doi 10.1002/pssa.201900334.
- V. Naumann, O. Breitenstein, J. Bauer, C. Hagendorf, Search for Microstructural Defects as Nuclei for PID-Shunts in Silicon Solar Cells, *Proceedings of 44th IEEE PVSC*, Washington, DC (USA), in press (2017).
- V. Naumann, C. Brzuska, M. Werner, S. Großer, C. Hagendorf, Investigations on the formation of stacking fault-like PID-shunts, *Energy Procedia* 92, 569-575 (2016).
- V. Naumann, D. Lausch, C. Hagendorf, Sodium decoration of PID-s crystal defects after corona induced degradation of bare silicon solar cells, *Energy Procedia* 77, 397-401 (2015).
- V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel, O. Breitenstein, C. Hagendorf, Nanoscopic studies of 2D-extended defects in silicon that cause shunting of Si-solar cells, *physica status solidi (c)* 12 (8), 1103–1107 (2015).
- V. Naumann, T. Geppert, S. Großer, D. Wichmann, H.-J. Krokoszinski, M. Werner, C. Hagendorf, Potential-Induced Degradation at Interdigitated Back Contact Solar Cells, *Energy Procedia* 55, 498-503 (2014).
- D. Lausch, V. Naumann, A. Graff, A. Hähnel, O. Breitenstein, C. Hagendorf, J. Bagdahn, Sodium Outdiffusion from Stacking Faults as Root Cause for the Recovery Process of Potential-Induced Degradation (PID), *Energy Procedia* 55, 486-493 (2014).
- V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel, J. Bauer, O. Breitenstein, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, S. Großer, J.

- Bagdahn, C. Hagendorf, Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells, Sol. Energ. Mat. Sol. Cells 120, 383 (2014).
- V. Naumann et al., Microstructural Analysis of Crystal Defects Leading to Potential-Induced Degradation (PID) of Si Solar Cells, Energy Procedia 33, 76 (2013).
 - V. Naumann, D. Lausch, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, J. Bauer, A. Hähnel, O. Breitenstein, S. Großer, J. Bagdahn, C. Hagendorf, The role of stacking faults for the formation of shunts during potential-induced degradation of crystalline Si solar cells, pss (RRL) 7 (5), 315, (2013).
 - V. Naumann, C. Hagendorf, S. Großer, M. Werner, J. Bagdahn, Micro Structural Root Cause Analysis of Potential Induced Degradation in c-Si Solar Cells, Energy Procedia 27, 1 (2012).
 - J. Bauer, V. Naumann, S. Großer, C. Hagendorf, M. Schütze, O. Breitenstein, On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells, physica status solidi - Rapid Research Letters (RRL) 6 (8), 331 (2012).
 - GIEnergy – Australia
 - Queensland Head Office
2A/17 Cairns Street, Loganholme, QLD,
4129
 - <https://canalsolar.com.br/en/the-pid-effect-and-its-action-on-photovoltaic-modules/>
 - <https://tr.jingsun-power.com/info/what-is-the-anti-pid-effect-of-solar-panel-99220962.html>
 - <https://kaco-newenergy.com/applications/anti-pid-solution>
 - <https://www.gses.com.au/potential-induced-degradation-pid/>