

PID – Fragen und Antworten

In der Dezemberausgabe 2010 berichtete das Fachmagazin Photon darüber, dass die in modernen PV-Anlagen hohen Voltzahlen unerwünschte Nebenwirkungen entfalten können: die sogenannten Leckströme, oder auch PID-Effekte (Potentialinduzierte Degradation) genannt. 20 oder mehr Prozent des Ertrags können durch das Auftreten von Leckströmen innerhalb des Moduls verloren gehen.

PID ist als Effekt schon seit mehreren Jahren bekannt. Erste Veröffentlichungen zu dem Thema stammen aus dem Jahr 2006 (Photon 4-2006, 6-2006 und 4-2007) und betrafen damals nur die kristallinen Hochleistungsmodule von Sunpower. 2007 trat dann PID auch bei manchen Evergreen Solarmodulen auf (Photon 1-2008 und 8-2008). Bei anderen kristallinen Solarmodulen war dieser Effekt bis vor Kurzem noch kein Thema.

Untersuchungsergebnisse von SOLON haben jedoch gezeigt, dass heutige kristalline Standardsolarzellen von spannungsbedingten Leistungseinbußen betroffen sein können. Die Zellproduktionsverfahren der letzten Jahre und die höheren Systemspannungen begünstigen das Auftreten des PID-Effektes.

Bisher liegen jedoch nur wenige Testergebnisse und Untersuchungen vor. Das Wissen um den PID-Effekt ist derzeit noch gering. Tatsache ist jedoch, dass spannungsbedingte Leistungseinbrüche bereits in der Praxis vorkommen. Gleichwohl hat die Solarbranche die einmalige Chance, ein potenziell großes Problem aus dem Weg zu räumen und zu lösen, bevor es der gesamten Branchen einen großen Schaden zufügt.

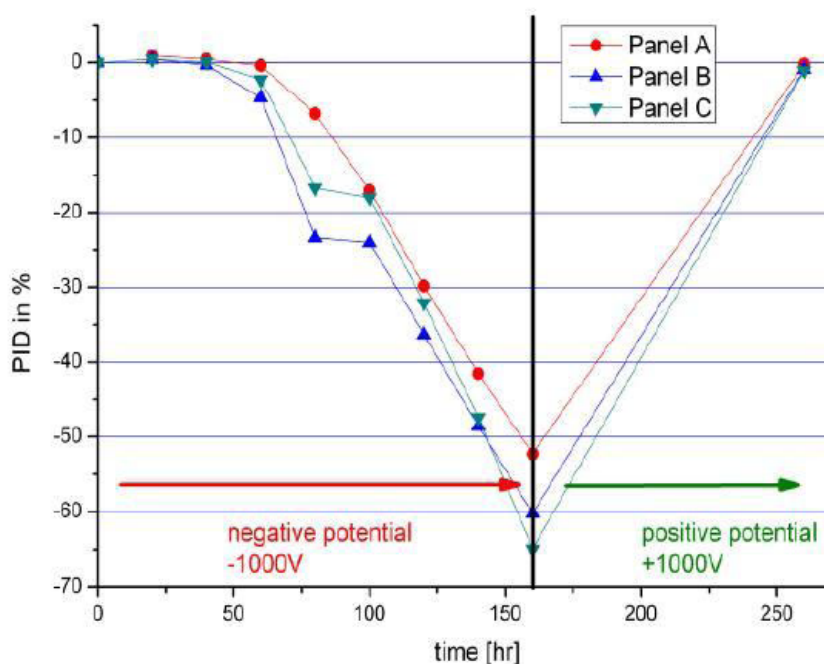
Das beste Mittel ist die Aufklärung über den Effekt und die Weitergabe des bekannten Wissens. Fronius weist jedoch ausdrücklich daraufhin, dass wir uns mit unseren Hinweisen auf die Untersuchungsergebnisse anderer stützen und selbst keine eigenen Testreihen durchgeführt haben.

Alle Fragen und Antworten dieser Veröffentlichung sind nach bestem Wissen und Gewissen recherchiert und zusammengetragen worden. Da sie sich aber auf Untersuchungen Dritter stützen, können wir keine Haftung für die gemachten Aussagen übernehmen.

Wie hoch ist das Schadenspotenzial wirklich?

Das Schadenspotenzial ist je nach Typ und Produktionsverfahren der Solarzellen unterschiedlich. Von daher gibt es auch für die Solarmodule keine einheitlichen Werte. Manche Module sind stark betroffen, andere weniger, manche gar nicht.

Die Tests zeigen diese Ergebnisse:





Man erkennt deutlich, dass der Effekt anfangs kaum messbar ist, sobald er aber sichtbar wird, beschleunigt er sich immer mehr. Dies kann zu einem Leistungsverlust von 50% führen! Im Test wurden 50% Leistungsverlust bereits nach nur 150 Stunden erreicht. Der Test wurde bei -1000 V durchgeführt, um den Verlauf zu beschleunigen.

In der Praxis sind die Module keinen Spannungen von -1000 V ausgesetzt. Deshalb ist zu erwarten, dass es ein paar Jahre dauert, bis der Leistungsabfall sichtbar wird. Weiterhin ist zu erwarten, dass die Leistung bei niedrigeren Spannungen langsamer und weniger steil abfällt als bei -1000 V.

Was muss ich tun, damit der PID-Effekt nicht auftritt?

Entweder, Sie verwenden Module, die der Hersteller als PID-frei bestätigt hat.

Oder

Ihr Modulhersteller gibt eine konkrete Erdungsempfehlung und Sie folgen dieser.

Oder (bei allen anderen Modulen):

Sie verwenden einen Wechselrichter mit galvanischer Trennung und erden den Modulstrang am negativen Pol. Dadurch sind alle Module nur noch positiven Spannungen ausgesetzt und PID wird verhindert.

Sind alle Module betroffen?

Nein, es sind nicht alle Module betroffen.

Allerdings:

Laut dem Solarmodulhersteller SOLON kann es für jede kristalline Zelltechnologie kritisch werden. Die Ursache von PID ist grundsätzlich der Aufbau der Solarzelle. PID wird durch hohe negative Spannungen gegenüber Erdpotential, hoher Temperaturen und hohe Luftfeuchtigkeit beschleunigt.

Es gibt im Solarmodul verschiedene Einflussfaktoren, die das Entstehen von Leckströmen stark bremsen oder auch verhindern können. Dabei spielt z.B. das Einbettungsmaterial des Moduls eine große Rolle. Ähnliches gilt für die Art der Antireflexbeschichtung auf der Zelle oder gar die Produktionstechnik der Antireflexschicht. Wichtig sind auch der Emitterwiderstand und der Basiswiderstand der Zelle und auch die Art und Weise wie der Zellenrand ausgeführt ist.

Es kann folglich sein, dass ein bestimmter Modultyp keinen PID-Effekt aufweist, weil – zufällig oder nicht – das Auftreten von Leckströmen durch den Zellaufbau verhindert wird. Es ist also definitiv nicht jedes Modul am Markt betroffen. Es kommt aber durchaus vor, dass von ein und demselben Hersteller ein Modultyp betroffen ist und ein anderer nicht. Der Grund liegt dann z.B. darin, dass der Modulhersteller seine Solarzellen von unterschiedlichen Zellherstellern bezieht.

Warum geht Fronius mit PID so offensiv an die Solarinstallateure?

Wenn Tages- und Publikumszeitungen über Ertragseinbußen in PV-Anlagen berichten würden oder gar über eine monatelange, erfolglose Fehlersuche, dann könnte dies für die gesamte Branche zu einem massiven Imageproblem werden.

Als Solon im Sommer 2010 erstmals auf verschiedenen Technologie-Symposien über PID berichtete, war das Interesse in der Industrie – erfreulicherweise – groß. „Erfreulich“, weil es zeigt, dass die Zell- und Modulhersteller das Problem ernst nehmen. Inzwischen ist bekannt, dass an Lösungen gearbeitet wird und Lösungen greifbar sind. – Doch dies löst das Problem nur für in der Zukunft zu bauende Anlagen.

Somit bleiben folgende Fragen offen:

Wie geht die Branche mit PID-bedingten Ertragsverlusten in bereits gebauten Anlagen um?

Wie kann sichergestellt werden, dass die Probleme in PID-Anlagen schnell gelöst werden (bevor die breite Öffentlichkeit von beschädigten Anlagen erfährt)?

Da der Installateur der erste Ansprechpartner des Anlagenbetreibers ist, kann die Antwort nur lauten: Die Installateure brauchen vollständige Informationen!



Die Installateure müssen wissen, was PID ist. Sie müssen wissen, wie es sich bemerkbar macht. Sie müssen wissen, wie Sie mit „alten“ Anlagen umgehen sollten. Sie müssen wissen, wie man das Problem an einer PID-betroffenen Anlage lösen kann. Und sie müssen wissen, wie sie ihr zukünftiges PID-Risiko vermindern können.

Was mache ich mit meinen bereits gebauten Anlagen?

Wenn es eine Erdungsvorgabe des Modulherstellers gibt, dann folgen Sie dieser Vorgabe.

Für alle anderen Solarmodule empfiehlt sich:

Anlagen, die Sie leicht erreichen können und die über einen Wechselrichter mit galvanischer Trennung verfügen, sollten Sie negativ erden. Damit ist das Problem gebannt, bevor es auftritt. Alle anderen Anlagen sollten Sie sehr genau überwachen. Solange der Ertrag nicht nachlässt, hat die Anlage auch keinen PID-Effekt. Vielleicht haben Sie ja Glück.

Sobald der Ertrag jedoch nachlassen sollte (und es handelt sich um kein ungewöhnlich schlechtes Sonnenjahr), sollten Sie mit dem Modulhersteller Kontakt aufnehmen. Außerdem sollten Sie der Empfehlung der nachstehenden Frage folgen.

Bei einer meiner in den letzten Jahren gebauten Anlagen habe ich den Verdacht, dass sie von PID betroffen ist – was sollte ich tun?

Wer eine Wärmebildkamera hat oder Zugang zu einer solchen Kamera, der sollte an einem sonnigen Tag mit Einstrahlungen oberhalb von 700 W/m^2 Fotos von der PV-Anlage aufnehmen. Wenn die Module an einem der Strangenden deutlich wärmer sind als die Module in der Strangmitte, dann besteht ein sehr starker Verdacht auf PID.

Mit diesem Ergebnis sollte der Installateur sich auf jeden Fall an den Modulhersteller wenden. Stimmen Sie mit diesem die weiteren Schritte ab. Beachten Sie auch, ob noch Gewährleistung besteht und was genau in den Garantiebedingungen genannt ist.

Sofern die Module ohne konkrete Erdungsvorschrift sind und ein Wechselrichter mit Trafo installiert ist, sollte man die Module als Sofortmaßnahme negativ erden. Diese Sofortmaßnahme ist wichtig, denn damit wird ein weiterer Leistungseinbruch gestoppt und die Module beginnen sich zu regenerieren. Falls in der Anlage ein trafoloser Wechselrichter installiert ist, können Sie diesen gegen einen Wechselrichter mit Trafo austauschen und diesen negativ erden.

Durch die nachträgliche negative Erdung bildet sich voraussichtlich der PID Effekt wieder zurück. Je nachdem, wie weit der PID-Effekt schon vorangeschritten ist, kann dies sehr lange dauern.

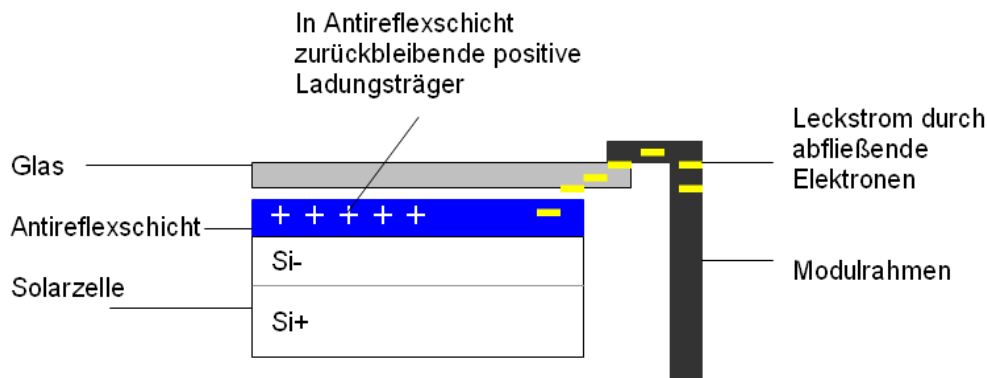
Alternativ (und sehr wahrscheinlich schneller) geht es, wenn eine positive Gegenspannung an die Module angelegt wird. Am Markt werden sogenannte Offset-Boxen angeboten, die nachts eine positive Gegenspannung an die Module anlegen. Mit dieser Maßnahme lässt sich der PID-Effekt höchstwahrscheinlich wieder beheben.

Nachdem sich die Module wieder regeneriert haben, muss der Trafo-Wechselrichter geerdet bleiben, damit sich der PID-Effekt nicht wieder neu aufbaut. Sofern sich in der Anlage ein trafoloser Wechselrichter befindet, der auch dort verbleiben soll, so muss auch die Offset-Box in der Anlage verbleiben und jede Nacht die Gegenspannung an den Modulen aufbauen.

Wie entsteht der Leckstrom? Wie entsteht PID?

Alle Module im Modulstrang weisen gegenüber dem Erdpotential eine Spannung auf. Die Module mit den höchsten positiven bzw. negativen Spannungen gegenüber Erdpotential befinden sich am Anfang und am Ende der Modulstränge.

Bei Modulen mit einer hohen negativen Spannung gegenüber Erdpotential kann es zur Ablösung von Ladungsträgern aus der Antireflexschicht kommen, die dann durch das Einbettungsmaterial und weiter über Glas und Modulrahmen zur Erde abfließen. In der Folge kommt es zur Ansammlung von positiven Ladungsträgern in der Antireflexschicht. Direkt unter der Antireflexschicht befindet sich jedoch das negativ dotierte Silizium der Solarzelle.



Si- = negativ dotierte Siliziumschicht.

Der Leckstrom hinterlässt in der Antireflexschicht positive Ladungsträger. Je mehr Zeit vergeht, desto mehr Ladungsträger sammeln sich an. Diese können nicht abfließen und heben die Wirkung der darunter liegenden negativ dotierten Siliziumschicht auf. Die Zelle wird quasi an der Oberfläche kurzgeschlossen. Die Solarzelle kann keinen Strom mehr erzeugen.

Durch eine Erdung des negativen Pols, befinden sich nur noch Module mit positiver Spannung gegenüber Erdpotential im Strang. Dadurch kann dann kein Leckstrom mehr entstehen. Somit kann durch negative Polerdung PID verhindert werden.

Ich habe Sunpowermodule eingesetzt. Sunpower fordert eine positive Erdung. Angeblich kann ich PID mit negativer Erdung vermeiden. Was soll ich tun?

Wenn Ihr Modulhersteller eine positive Erdung vorschreibt, dann sollten Sie dieser Empfehlung unbedingt folgen. Letztlich weiß der Hersteller selbst am besten, welche Effekte an seinen Solarzellen auftreten können.

Wer haftet bei Ertragsverlusten aufgrund von PID?

Theoretisch ist die Sachlage klar: Die Module lassen in der Leistung nach und unterschreiten die Leistungsgarantien des Modulherstellers.

Vermutlich ist die Haftungsfrage jedoch nicht ganz eindeutig. Einerseits haben die Modulhersteller im Regelfall Leistungsgarantien ausgesprochen. Andererseits war der PID-Effekt bei Standardmodulen bisher nicht bekannt. Durch die Veröffentlichungen in Fachzeitschriften wurde der PID-Effekt jedoch zum bekannten Stand der Technik. Es könnte also argumentiert werden, dass der Installateur nach dem Stand der Technik hätte installieren müssen (also im Regelfall mit negativer Erdung). Einen solchen Streitfall wird letztlich ein Gericht entscheiden müssen.

In der Praxis sehen wir jedoch ein anderes Problem: Damit die Leistungsgarantie greift, muss in sehr vielen Fällen der Anlagenbetreiber nachweisen, dass eine Minderleistung vorliegt. Der PID Effekt tritt aber nicht bei allen Modulen der PV-Anlage auf. Der Anlagenbetreiber steht folglich vor dem Problem, dass er auch tatsächlich die „richtigen“ Module auswählt, um sie zur Prüfung einzuschicken. Der Installateur muss wahrscheinlich damit rechnen, dass der Anlagenbetreiber versuchen wird, die Lösung des Problems auf ihn abzuwälzen.

Trägt Fronius die Kosten einer nachträglichen Erdung?

Die Verantwortung für den PID-Effekt liegt bei den Modulherstellern, denn die Modulhersteller müssen vorgeben, wie ihre Module installiert werden müssen, um die versprochene Leistung einzuhalten. Von daher ist Fronius auch nicht der Kostenträger für nachträgliche Erdungs- oder Umbaumaßnahmen.

Bei den Wechselrichtern der Fronius IG Plus Serie sind die Erdungskosten niedriger als bei allen anderen Wechselrichtern am Markt.



Was muss ich für meine zukünftige Anlagenplanung beachten?

Gibt es für das von Ihnen verwendete Modul eine Erdungsvorschrift? Wenn ja, dann befolgen Sie diese.

Gibt es für das von Ihnen verwendete Modul eine Herstellerbestätigung, dass das Modul vom PID-Effekt nicht betroffen ist? Wenn ja, dann können Sie es verwenden, ohne zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen.

Bei allen anderen Modulen, können Sie auf Nummer Sicher gehen, indem Sie den negativen Pol der Modulstränge erden. Aber Achtung: Prüfen Sie, ob Ihr Wechselrichter die negative Polerdung verträgt ohne dadurch beschädigt zu werden oder seine Leistungsfähigkeit einzubüßen. Besonders Wechselrichter mit galvanischer Trennung sind für die negative Polerdung geeignet.

Beispiel: Fronius IG Plus Serie: Der Wechselrichter ist schon ab Werk für die Polerdung vorbereitet. Sie müssen vor Ort nur noch die Erdungssicherung einsetzen.

Warum haben die Modulhersteller PID nicht beachtet, wenn der Effekt doch schon lange bekannt ist?

Der PID-Effekt ist bei Rückseitenkontaktzellen und bei Dünnschichtzellen bekannt. Als im Jahr 2005 NREL Erkenntnisse über PID-Effekte an kristallinen Zellen veröffentlichte, waren die Effekte an den damaligen Zellen so schwach, dass sie in der Praxis keine Rolle spielten.

Als sich später die Produktionstechnologie für Solarzellen änderte, ist nicht noch einmal untersucht worden, ob sich der PID-Effekt mit den neuen Technologien stärker bemerkbar macht. Erst die Veröffentlichungen von Solon haben gezeigt, dass heutige p-Type Solarzellen (kristalline Standardzellen) von PID betroffen sind.

Tests an Anlagen, die ca. 10 Jahre alt waren, haben ergeben, dass dort kein PID-Effekt festzustellen war. Wie kommt das? Was war damals anders?

Der Grund liegt im Zellaufbau. Zellen aus z.B. 2002 waren wesentlich dicker (oft noch über 300 µm) und die Beschichtungsverfahren der Antireflexschicht waren andere als heute. Um es einfach auszudrücken: Die Fertigungsverfahren und der Zellaufbau moderner Zellen begünstigen das Ablösen der Elektronen aus der Zelle und das Entstehen der Leckströme.

Neben einer hohen Systemspannung und einer gewissen Luftfeuchtigkeit werden die Leckströme von diesen Punkten beeinflusst:

- Die Höhe des Emitterwiderstandes der Zelle
- Die Höhe des Basiswiderstandes der Zelle
- Die Ausführung des Zellenrandes
- Die Ausführung der Antireflexschicht auf der Zelloberfläche
- Die Beschichtungstechnologie, mit der die Antireflexschicht aufgebracht wird
- Das Verkapselungsmaterial des Moduls

Die Ausführung dieser Punkte war bei älteren Zellen zufällig derart, dass die Leckströme nicht so leicht entstehen konnten.

Ab welcher Spannung tritt PID auf? Ab wann wird es kritisch?

Bisher ist bekannt, dass PID umso eher und umso stärker auftritt, je höher die negative Spannung am Modul ist. Die Tests, die von Solon durchgeführt wurden, wurden bei einer negativen Spannung von -1000 V durchgeführt. Dies entspricht einer Systemspannung von 2000 V (von -1000 V bis + 1000 V)

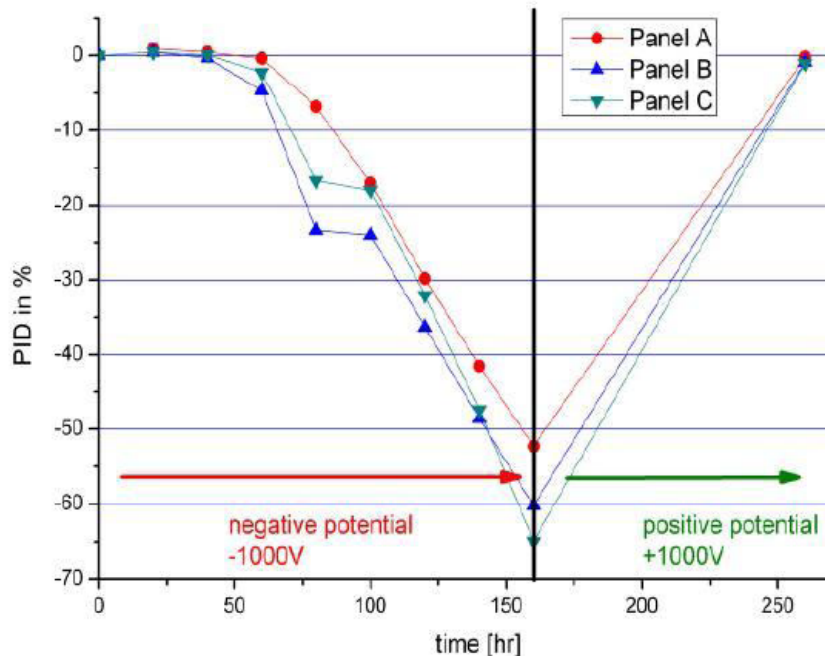
In der Praxis sind solche hohen negativen Spannungen bisher noch unüblich. Dieses Spannungsniveau wurde von Solon sehr wahrscheinlich ausgewählt, um den Test zu beschleunigen.

Bei -1000V wiesen Testmodule folgende Leistungsminderung auf:

- nach 40 Stunden: kaum nennenswerte Effekte
- nach 80 Stunden: ca. 30% Leistungsminderung
- nach 150 Stunden: über 50% Leistungsminderung

Wichtig: PV-Anlagen sollen über 20 Jahre halten und nicht nur 150 Stunden.

Bei Spannungen deutlich kleiner -1000 V hätten die Module voraussichtlich ebenfalls diese Leistungsverluste gezeigt, der Prozess wäre nur viel langsamer abgelaufen. Wahrscheinlich hätte er bei heutigen Systemspannungen mehrere Jahre gedauert.



Allerdings lässt sich die Frage der Zeitdauer bisher nicht genau bestimmen, da dafür die Testreihen und Erfahrungswerte fehlen. Uns sind keine Testreihen bei anderen Spannungen als -1000 V bekannt. Vermutlich kann derzeit niemand sagen, um wie viel schwächer oder später der PID Effekt auftritt, wenn man die Systemspannung auf 300 V, 500 V oder 700 V senkt.

Voraussichtlich muss man sich darauf einstellen, dass sich der PID-Effekt bei betroffenen Anlagen erst nach ein paar Jahren bemerkbar macht. Im Schaubild kann man gut erkennen, dass er sich von dem Moment an, an dem er sichtbar wird, immer weiter verstärkt. Deshalb sollte nach dem Auftreten des PID-Effektes möglichst schnell reagiert werden.

Sind die Solon-Tests glaubwürdig?

Die von Solon durchgeführten Testreihen waren umfangreich und wurden mit Zellen unterschiedlicher Hersteller durchgeführt. Die Zellen erscheinen repräsentativ für kristalline p-Type Solarzellen (die heutigen kristallinen Standardzellen). Die veröffentlichten Testergebnisse sind sehr schlüssig. Fronius hält die Testergebnisse der Solon für sehr glaubwürdig.

Kann man riskieren, auch ohne Erdung zu installieren?

Module, für die Ihnen der Hersteller zusichert, dass sie PID-frei sind, können ohne Erdung installiert werden. Module für die Ihnen der Modulhersteller eine klare Empfehlung zum Erden oder nicht Erden gibt, sollten gemäß den Anweisungen des Herstellers installiert werden. Zum Einen ist dies eine Frage der Garantie und zum Anderen kennt der Hersteller schließlich sein Produkt am besten.

Für die allermeisten Module am Markt fehlen jedoch konkrete Anweisungen der Hersteller. Wenn Sie dann ohne Erdung installieren,

- dann kann es sein, dass Sie ein Modul ausgewählt haben, dass nur sehr geringe oder keine Neigung zu PID aufweist
- dann können Sie durch die Wahl einer geringen DC-Spannung die Wahrscheinlichkeit und die Auswirkung von PID verringern
- und Sie können ganz einfach Glück haben.

Wenn Sie jedoch auf Nummer sicher gehen wollen, dann entscheiden Sie sich für die negative Modulerdung.

Was unternimmt die Industrie gegen PID?

Soweit wir beobachten konnten, hat die Zell- und Modulindustrie die Ergebnisse von Solon zu großen Teilen mit Interesse aufgenommen.

In Zertifizierungs- und Normungsgremien werden Prüfungen mit höheren Spannungen diskutiert. Die Zellhersteller können durch Modifizierungen im Fertigungsprozess und im Zellaufbau dafür sorgen, dass PID-bedingte Leckströme unterbunden werden. Modulhersteller haben ebenfalls die Möglichkeit, Modulmaterialien zu verwenden, die die PID-Leckströme wirksam verhindern.

Wir rechnen damit, dass durch die Aktivitäten der Modul- und Zellhersteller das PID-Problem innerhalb von zwei Jahren gelöst sein wird und sich dann weitestgehend nur noch PID-freie Module im Angebot befinden.

Sind bei PID-Ertragsverlusten alle Module im Modulfeld betroffen?

Klare Antwort: Nein.

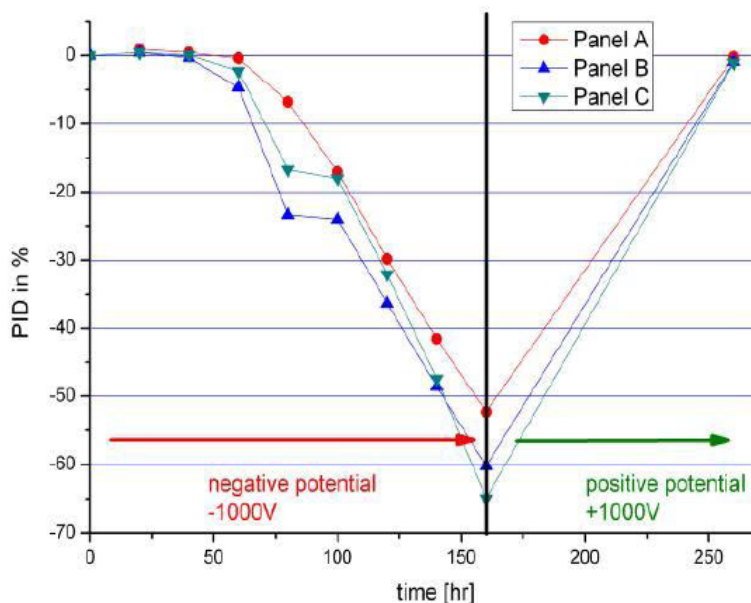
Je nachdem, an welcher Stelle innerhalb des Stranges sich ein Modul befindet, ist es einer positiven oder negativen Spannung gegenüber Erdpotential ausgesetzt. Der Hauptverursacher des PID-Effektes ist eine hohe negative Spannung gegenüber Erdpotential. Folglich sind diejenigen Module am stärksten betroffen, die den höchsten negativen Spannungen ausgesetzt sind. Durch die entstehenden Leckströme wird die Stromstärke der betroffenen Module vermindert. Durch die Reihenschaltung im Strang wirken dann die betroffenen Module leistungsdrosselnd, auch auf alle anderen Module im Strang.

Lassen sich Module mit PID-bedingter Leistungsminderung „reparieren“?

Der leistungsmindernde PID-Effekt baut sich wieder ab, wenn der negative Pol des Modulstranges geerdet wird. Dies kann jedoch mehrere Wochen dauern, je nachdem wie weit der PID-Effekt schon fortgeschritten war. In manchen Fällen ist wahrscheinlich eine 100%-Regenerierung möglich. Durch Anlegen einer hohen positiven Spannung an den beschädigten Modulen geht die Regeneration voraussichtlich schneller.

Am Markt werden sogenannte Offset-Boxen angeboten, die nachts eine positive Gegenspannung an die Module anlegen. Mit dieser Maßnahme lässt sich der PID-Effekt höchstwahrscheinlich wieder beheben. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme hängt davon ab, wie hoch die positive Spannung ist, die am beschädigten Modul anliegt.

Auch einzelne Module lassen sich wahrscheinlich auf diese Art wieder „reparieren“. Sie können im Labor einer hohen positiven Spannung ausgesetzt werden. Dies ist die Methode, mit der ein Modulhersteller im eigenen Werk voraussichtlich den PID-Effekt rückgängig machen würde.





Auf dem Schaubild sieht man den aufgrund der sehr hohen Spannung beschleunigten Verlauf: In der linken Hälfte sind die PV-Module einer hohen negativen Spannung ausgesetzt. Bei einer Spannung von -1000 V war nach bereits 150 Stunden ein Leistungsverlust von zum Teil deutlich über 50% zu sehen. Als dann die Spannung umgekehrt wurde, waren die Module einer positiven Spannung von +1000V ausgesetzt. Nach weiteren 100 Stunden war die alte Leistungsfähigkeit der Module wieder hergestellt.

Dies war ein beschleunigter Labortest. Der Test zeigt, dass die Module „repariert“ werden können. Ob dies in der Praxis vollständig möglich ist, kann nicht garantiert werden. Denn es spielt auch eine Rolle, wie lange der PID-Effekt bereits vorlag und ob im Modul durch das Fließen des Leckstroms eine Materialbeschädigung entstanden ist.

Wo ist der Unterschied zwischen PID, dem positiven Erden bei Rückseitenkontaktzellen und dem TCO Effekt bei Dünnschicht?

Eigentlich sind alle drei Effekte eine Art von PID (**Potential Induced Degradation**). Warum? Weil bei allen Effekten durch negative bzw. positive Potentiale gegen Erde eine Leistungsdegradation stattfindet. Die Ursache ist in allen drei Fällen der sogenannte Leckstrom. Ebenso wird in allen drei Fällen der Effekt durch hohe Systemspannungen verstärkt.

Ist bekannt, welche Module von PID betroffen sind?

Für eine solche Modulübersicht, müssten einheitliche Prüfungen existieren. Dies ist jedoch bisher nicht der Fall. Uns ist keine Übersicht von PID-betroffenen Modulen bekannt.