

# Power Hardware-in-the-Loop test system.

Betreuer

Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

Vorgelegt von

Dr. techn. Dipl.-Ing. Ziqian Zhang, BSc

## 1 Vergleichende Studie über Testmethoden

Der Grid-Kompatibilitätstest prüft die Fähigkeit des Betriebs von DG-Systemen unter verschiedenen Grid-Umgebungen. Um zu bestimmen, ob die „Equipment under Test“(EUT), die in dieser Arbeit DG-Systeme sind, die angemessene Netzverträglichkeit aufweisen, ist es notwendig, dem EUT die Situation der Netzumgebung (Erregung) zu geben. Je nach dem Erzeugungsmodus der Anregung kann die Prüfung in eine offene und eine geschlossene Prüfmethode unterteilt werden.

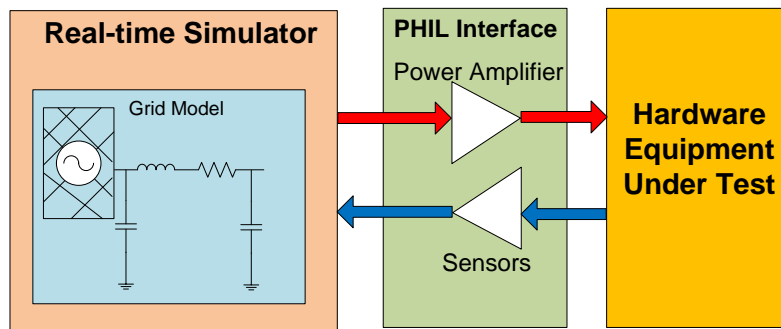
Die Open-Loop-Prüfmethode erzeugt die voreingestellten Netzumgebungssituationen und speist in das EUT ein. Die Reaktion des EUT auf diese Anregung ist nicht erlaubt oder nicht verfügbar, um die nachfolgende Anregung zu beeinflussen. Die Prüfmethode der vorliegenden Netzverträglichkeitsprüfung ist die Open-Loop-Prüfmethode.

Die Anregung aus der Prüfmethode mit geschlossenem Regelkreis wird aus den Simulationsergebnissen gewonnen. Die Reaktion des Prüflings wird in das Prüfsystem zurückgeführt, und dann wird die resultierende Erregung beeinflusst. Eine solche Prüfmethode bildet einen geschlossenen Regelkreis und wird daher als Prüfmethode mit geschlossenem Regelkreis bezeichnet. Die Testmethode mit geschlossenem Regelkreis beinhaltet die Testmethode der physikalischen Modellsimulation, die Testmethode der numerischen Modellsimulation, die Controller-Hardware-in-the-Loop-Testmethode und die Power-Hardware-in-the-Loop-Testmethode.

## 2 Power Hardware-in-the-Loop Test System

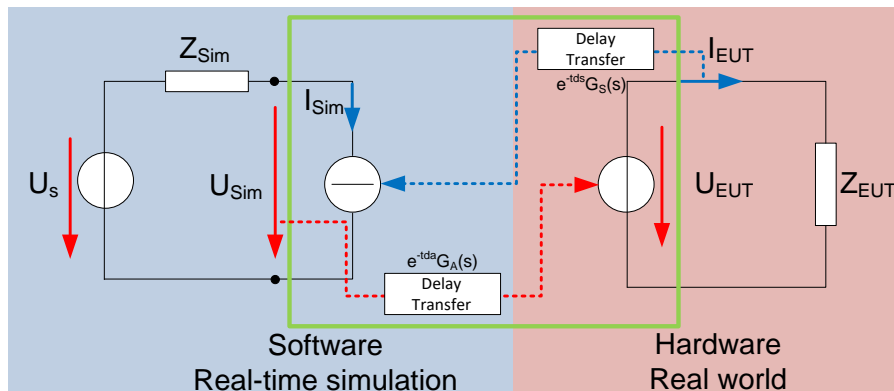
Das Hardware-in-the-Loop (HIL)-Testsystem kann dem Prüfling jede realistische Testumgebung bieten. Die tatsächliche Reaktion des Prüflings kann vor der Inbetriebnahme des Prüflings getestet werden. Einige extreme Testbedingungen können bei der HIL-Prüfung leicht reproduziert werden. Dies kann eine Menge Kosten sparen und das Risiko einer Beschädigung des Prüflings reduzieren. Der Betrieb der HIL-Prüfung wird durch die Simulationsmodell-Software im Echtzeitsimulator und die HIL-Schnittstelle realisiert, die für den Informationsaustausch oder den Leistungsaustausch zwischen dem EUT und der Simulationsmodell-Software verwendet wird.

Das EUT im Falle eines PHIL-Prüfsystems ist das komplette DG-System. Da der Signal- und Leistungsaustausch zwischen dem EUT und einem RTS über Hochleistungssignale erfolgt, ist die PHIL-Schnittstelle erforderlich. Die PHIL-Schnittstelle ist verantwortlich für die Umwandlung des Leistungssignals vom EUT in ein Niedrigleistungssignal für den RTS durch die Sensoren, wobei gleichzeitig das Niedrigleistungssignal vom RTS durch den Leistungsverstärker umgewandelt wird, um ein Hochleistungssignal für das EUT zu erzeugen.



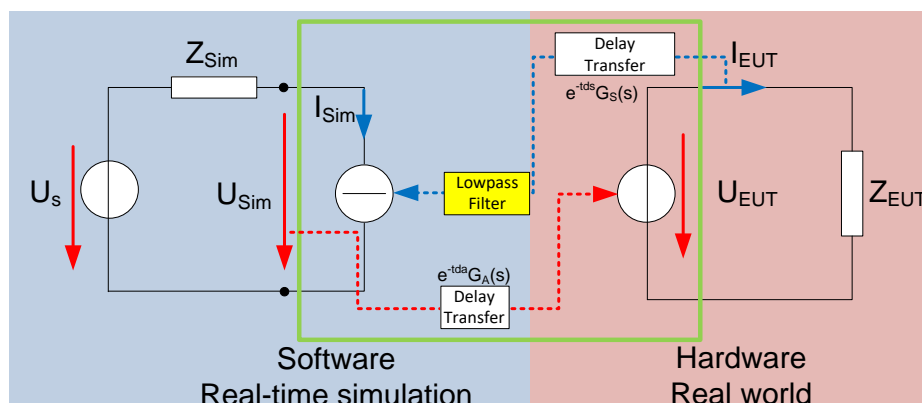
Der PHIL-Schnittstellenalgorithmus ist für die Interaktion zwischen der physikalischen Seite (EUT) und der Softwareseite (numerisches Gittermodell) durch die Sensoren und den Leistungsverstärker verantwortlich. Das Genauigkeits- und Stabilitätsproblem des Systems, das durch die Begrenzung der Hardware des PHIL-Hochleistungsprüfsystems (wie Verzögerung, Bandbreite, Rauschen usw.) verursacht wird, kann durch den geeigneten PHIL-Schnittstellenalgorithmus verbessert werden.

Der klassischste PHIL-Schnittstellenalgorithmus ist die Ideal-Transformer-Methode (ITM). Aufgrund seiner einfachen Struktur und seines klaren Prinzips ist er weit verbreitet.



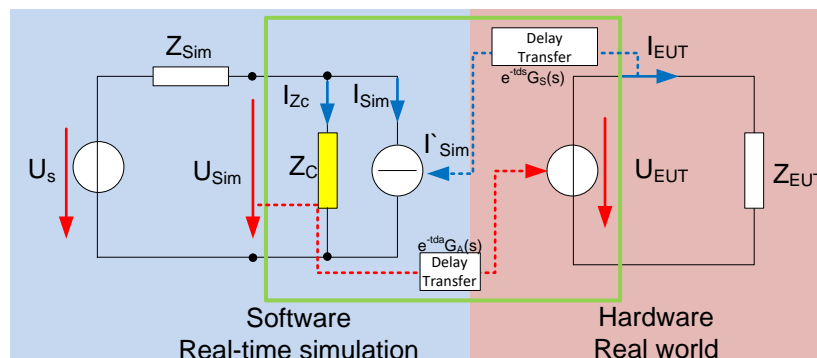
Die Genauigkeit und Stabilität des Systems werden hauptsächlich durch die Verzögerung des Systems und die Impedanzen beeinflusst. Um die Genauigkeit und Stabilität des Systems zu verbessern, wird der Entwurf und die Analyse der Kompensationsmethode für die Ideal Transformer Methode durchgeführt.

Der relative Fehler nimmt mit der Frequenz zu. Der relative Fehler von ITM für hohe Frequenzen ist sehr groß, so dass er die Stabilität des Systems ernsthaft verschlechtern wird. Daher kann im ITM ein Tiefpassfilter zur Unterdrückung des Hochfrequenzsignals des PHIL-Testsystems hinzugefügt werden, um die Stabilität des Systems zu verbessern.

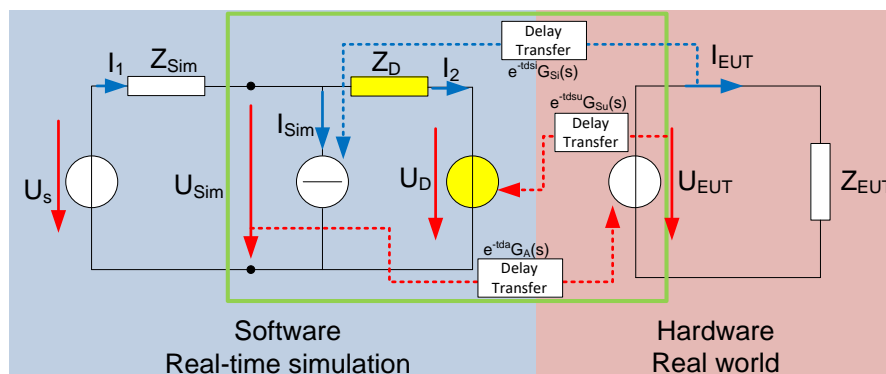


Wenn die Impedanz der Softwareseite  $Z_{Sim}$  größer als die Impedanz der Hardwareseite  $Z_{EUT}$  ist, wird das System instabil. Man kann also das  $Z_{EUT}$  größer oder das  $Z_{Sim}$  kleiner machen, um das Stabilitätskriterium zu erfüllen. Die Methode, das  $Z_{EUT}$  größer zu machen, besteht darin, auf der Hardwareseite zusätzlich eine Reihenimpedanz zu schalten. Diese Methode verändert offensichtlich die Eigenschaften des EUT. Dadurch wird der Fehler in der Echtzeitsimulation gemacht.

In dieser Arbeit wird die Advanced Ideal Transformer Method (AITM) vorgestellt. Das Grundprinzip besteht darin, dass die Impedanz auf der Softwareseite durch eine parallel geschaltete Impedanz  $Z_C$  reduziert wird, gleichzeitig wird das Ausgangssignal der gesteuerten Stromquelle auf der Softwareseite kompensiert, um den Ausgang der Softwareseite  $U_{Sim}$  gleich der normalen Ideal Transformer Methode zu halten.



Basierend auf der Analyse von ITM kann die Verzögerung und Verzerrung der Interaktion zwischen der Software- und der Hardwareseite die Stabilität und Genauigkeit des Systems verringern. Um dieses Problem vollständig zu lösen, wird die Modellierung und Simulation der Hardwareseite in der Seitensoftware durchgeführt. Auf diese Weise werden die durch die PHIL-Schnittstelle verursachten Verzögerungen und Verzerrungen eliminiert.

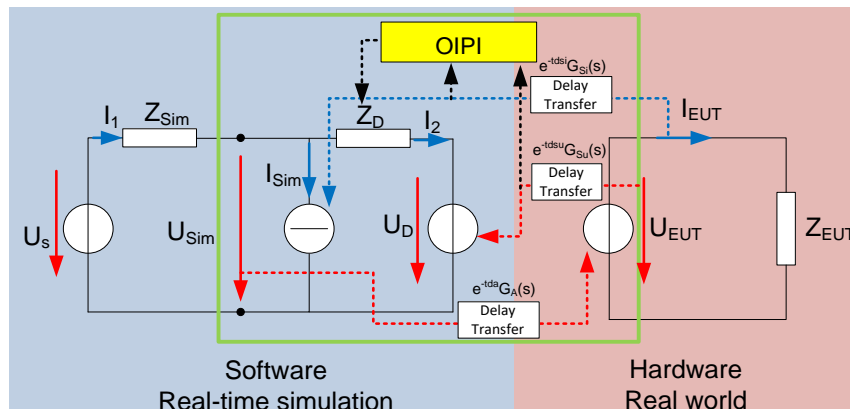


Das Grundprinzip der Dämpfungsimpedanzmethode (DIM) besteht darin, dass softwareseitig eine Dämpfungsimpedanz  $Z_D$  zur Simulation der Impedanz des Prüflings  $Z_{EUT}$ , eine geregelte Spannungsquelle  $U_D$  zur Simulation des Leistungsverstärkers  $U_{EUT}$  verwendet wird.

Das Stabilitätsverhalten des Systems ist optimal, wenn die Dämpfungsimpedanz  $Z_D$  genau der Impedanz des Prüflings  $Z_{EUT}$  entspricht.

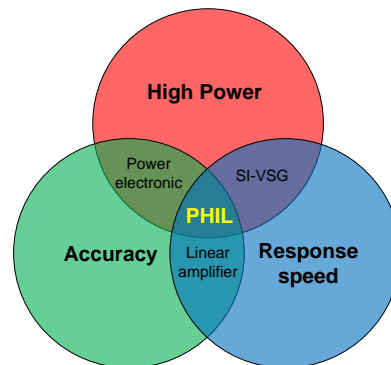
Die Prüflinge in dieser Arbeit sind DG-Systeme, die sich aus nichtlinearen Komponenten zusammensetzen. Ihre Ausgangskennlinie wird durch den Regler in Beziehung gesetzt, so dass ihre Impedanz  $Z_{EUT}$  aufgrund der Regelstrategie des DG-Systems eine nichtlineare stückweise Funktion ist. Das EUT ist eine Black Box für das PHIL-Testsystem. Daher kann seine Impedanz vor der PHIL-Prüfung nicht vorhergesagt werden. Um den genauen Impedanzparameter des

Prüflings während des PHIL-Tests mit der Dämpfungsimpedanzmethode zu erhalten, wird in dieser Arbeit eine Online-Impedanzparameter-Identifikation (OIPI) vorgestellt.



### 3 Hochleistungsverstärker

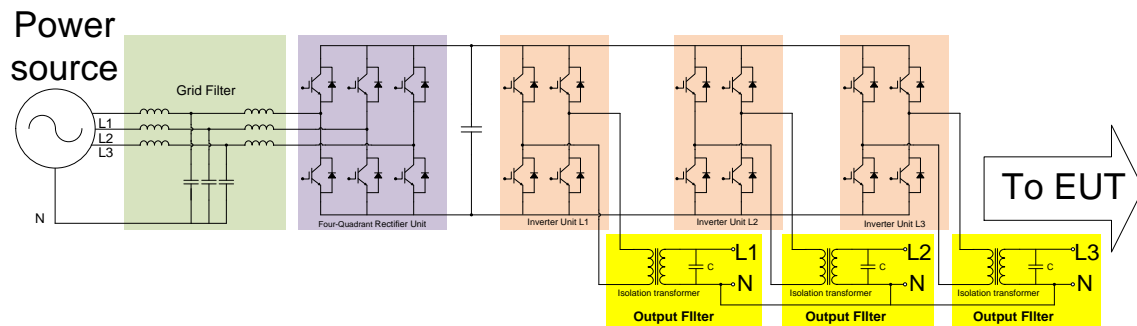
In einem Power-Hardware-in-the-Loop-Testsystem ist der Leistungsverstärker für die Übertragung des berechneten Ergebnisses der Gittermodell-Software vom Echtzeitsimulator auf das Hardware-EUT verantwortlich. Gemäß der Systemanforderungsanalyse in Kapitel 3.6 ist die Grundanforderung an den Leistungsverstärker in einem PHIL-Testsystem der hohen Leistungsklasse hohe Leistung, hohe Genauigkeit und schnelle Reaktionsgeschwindigkeit. Diese drei Anforderungen sind oft widersprüchlich.



Während der Netzverträglichkeitsprüfung eines DG-Systems überträgt das DG-System die Leistung an den Leistungsverstärker. Um Energie zu sparen, wird im Leistungsverstärker ein Vier-Quadranten-Gleichrichter eingesetzt, der die bidirektionale Energieübertragungsfähigkeit für das PHIL-Testsystem bereitstellt. Die Nennleistung des Prüflings in dieser Arbeit beträgt 500 kVA, unter Berücksichtigung der Schwankungen der Ausgangsleistung des Prüflings beträgt die Nennleistung des Vier-Quadranten-Gleichrichters ebenfalls 800 kVA.

Parameter Name	Value
Rated phase voltage $U_N$	400 V
Voltage range	0%-135% $U_N$
Rated frequency $f_N$	50/60 Hz
Frequency range	47 Hz – 63 Hz
Expected harmonic frequency range	<2000 Hz
Accuracy of voltage	< $\pm 0.3\%$ $U_N$
Accuracy of frequency	<0.3% $f_N$
Response time	$\leq 100 \mu\text{s}$
THD (<50th)	<1%

Der Leistungsverstärker besteht aus einer Gleichrichtereinheit und den Wechselrichtereinheiten. Die Gleichrichtereinheit hat einen dreiphasigen LCL-Filter und einen Dreiphasen-Vierquadranten-Gleichrichter. Die Wechselrichtereinheit hat drei Sätze unabhängiger einphasiger Wechselrichtereinheiten.



Der PI-Regler entspricht dem System mit einem zusätzlichen Pol und einem zusätzlichen Nullpunkt. Der Pol befindet sich im Ursprung der Koordinaten und verbessert die gleichmäßige Leistung des Systems. Der Nullpunkt befindet sich auf der Achse der linken Halbebene und verbessert die Dämpfung des Systems.

Aber der PI-Regler kann dem AC-Signal nicht ohne stationären Fehler folgen. Um diesen stationären Fehler zu verringern, muss der Integralkoeffizient vergrößert werden, aber dann wird auch die Phasenverschiebung zwischen dem Sollwert und dem Ausgang erhöht. Wenn der Proportionalkoeffizient vergrößert wird, kann dies zu einer Systemschwingung führen. Im Frequenzbereich ist der PI-Regler gleichbedeutend mit einem Tiefpassfilter. Das Hochfrequenzsignal wird durch den PI-Regler gedämpft. Daher kann die Anforderung an die Betriebsbandbreite nicht erfüllt werden. Es ist eine neue Regelstrategie erforderlich, die die Nachführung des AC-Signals ohne stationären Fehler erreichen kann, eine gute dynamische Leistung aufweist und die Anforderungen an die Betriebsbandbreite erfüllt.

Mit Blick auf die obigen Anforderungen wird der Proportional-Resonanz-Regler (PR-Regler) vorgestellt:

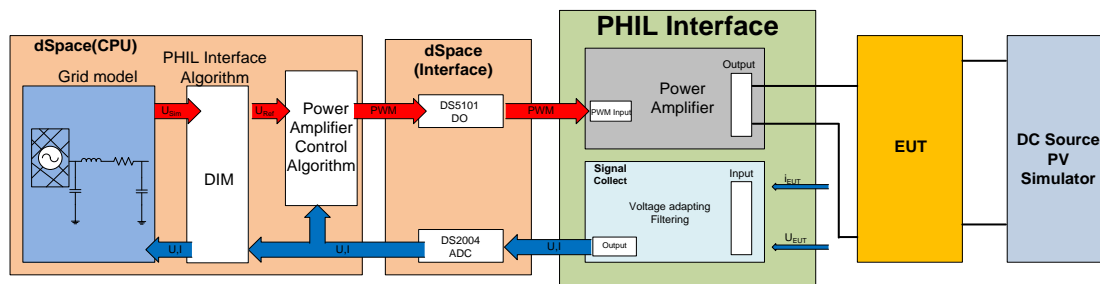
$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{2k_R \omega_C s}{s^2 + 2\omega_C s + \omega_0^2}$$

Ein 800 kVA Leistungsverstärker des PHIL-Testsystems wird gebaut. Die Gleichrichtereinheit besteht aus zwei Sätzen parallel geschalteter Dreiphasen-Vierquadranten-Gleichrichter. Die Wechselrichtereinheit besteht aus drei Sätzen unabhängiger einphasiger Wechselrichter. Die Fotos des Leistungsverstärkers sind unten abgebildet.



## 4 Power Hardware-in-the-Loop testing mit netzgekoppelten Wechselrichtern

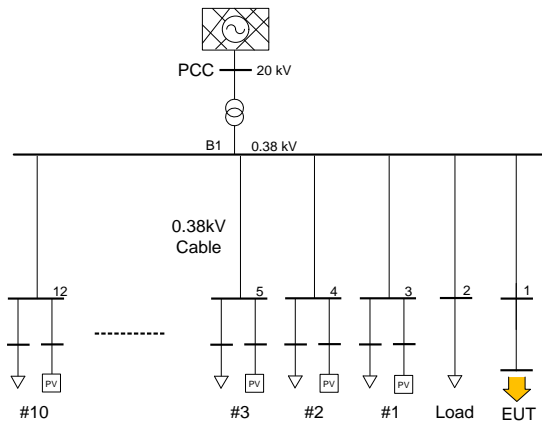
Anhand der Konfiguration wird das komplette PHIL-Testsystem aufgebaut. Der DC-Port des EUT ist mit der DC-Quelle, dem PV-Simulator, verbunden. Der PV-Simulator entspricht der Simulation des Ausgangs der photovoltaischen Anordnung(en). Basierend auf der theoretischen Analyse in Kapitel 3 und den Versuchsergebnissen in Kapitel 6.2 wird die Dämpfungsimpedanzmethode im PHIL-Prüfsystem als PHIL-Schnittstellenalgorithmus angewendet.



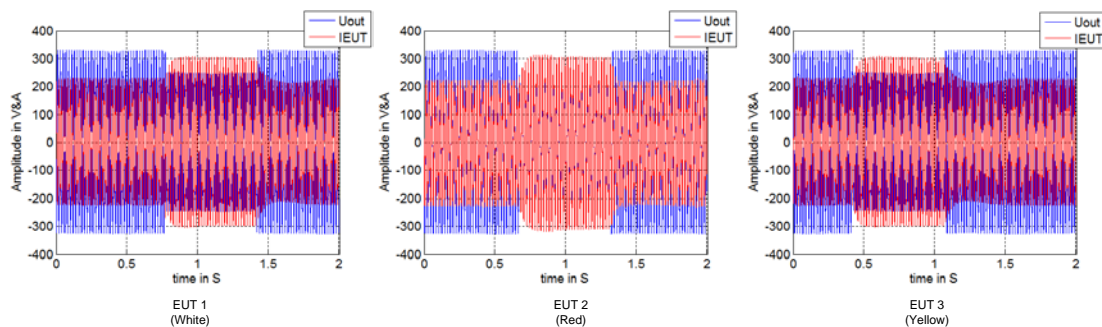
Als Prüflinge in diesem Kapitel werden die drei verschiedenen netzgekoppelten Photovoltaik-Wechselrichter von drei verschiedenen Herstellern verwendet. Die Nennleistung all dieser Prüflinge beträgt 4000 W, und die Nennausgangsspannung beträgt 230 V<sub>RMS</sub>. Von links nach rechts sind die Prüflinge EUT1 (weiß), EUT2 (rot) und EUT3 (gelb).



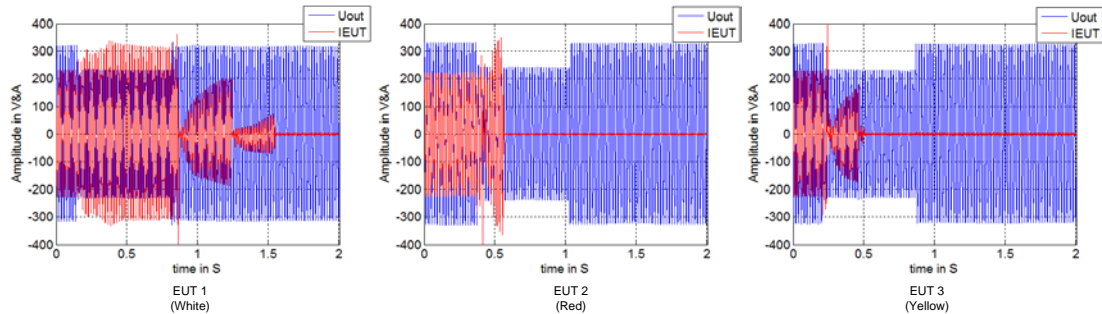
Um eine Netzumgebung im Wohnbereich nachzubilden, in der die netzgekoppelten Photovoltaik-Wechselrichter verwendet werden, wird ein Netzmodell in dSpace erstellt, wie unten dargestellt.



Die Abbildungen unten zeigen die LVRT-Prüfergebnisse der drei verschiedenen Prüflinge mit 100% Nennausgangsleistung, einer Restspannung von 0,75 p.u. und einer Dauer von 625 ms.



#### LVRT testing of EUT1, 2 and 3 in 100% rated power with an ideal voltage source



#### LVRT testing of EUT1, 2 and 3 in 100% rated power with the PHIL test system

Die Ausgangsströme der Prüflinge ändern sich während der Prüfung alle gleichmäßig, wenn die ideale Spannungsquelle angelegt wird. So kann das EUT die LVRT-Prüfung mit der idealen Spannungsquelle problemlos bestehen. Es zeigt, dass sich die Ausgangsströme der Prüflinge während der Prüfung, wenn das PHIL-Prüfsystem angewendet wird, alle dramatisch ändern. Und keines der Prüflinge kann die LVRT-Prüfung mit der gleichen Prüfbedingung bestehen, da sich alle Prüflinge nach oder während der Spannungseinbrüche abschalten.

Daher reduziert die ideale Spannungsquelle die Schwierigkeit der LVRT-Prüfung. Das PHIL-Prüfsystem bietet eine reale Prüfgerumgebung, wodurch die LVRT-Prüfung realistischer wird.