

# 特 集 論 文

## 太陽光発電用パワーコンディショナの理想的なLVRT特性の実現

Realization of the Ideal Performance of LVRT Operation for a Power Conditioner of PV

宇田 怜 史*	羽田 儀 宏*
S. Uda	Y. Hada
西村 莊 治*	山田 真 也**
S. Nishimura	S. Yamada
張 金 林**	小林 猛**
J. Zhang	T. Kobayashi
長谷部 孝 弥**	松川 満**
T. Hasebe	M. Matsukawa

### 概要

太陽光発電を始めとした分散型電源が電力系統に大量に接続されると、瞬低等による一斉不要解列で系統側に広域停電を引き起こす可能性が指摘されている。近年ではPV用パワーコンディショナ（以下、PV-PCS）に、瞬低時も運転継続させるLVRT（Low Voltage Ride Through）機能の搭載が国内外で要求されている。本稿では、国内の連系要件に適合したLVRT機能の開発検証結果と、中国のLVRT認定試験を受験した結果について報告する。

### Synopsis

If the distributed generation that includes photovoltaic generation is connected to an electric power system in large quantities, it may cause a wide area blackout in the power system by the parallel off simultaneously which occurs instantaneous voltage drop. In late years the installation of LVRT (Low Voltage Ride Through) function that keeps driving at instantaneous voltage drop is required for power conditioner of PV (PV-PCS). We report the results of the development of LVRT function that adapted to Grid-interconnection Code and the standard examination of Chinese LVRT requirements.

### 1. はじめに

近年、地球温暖化防止、資源枯渇への対応の観点から再生可能エネルギーの導入が進められ、中でも太陽光発電は2012年7月の全量買取制度を皮切りに急速に導入が進んでいる。しかし、電力系統に大量導入するためには、次のような課題を克服する必要がある<sup>(1)</sup>。

- (1) 余剰電力の発生
- (2) エネルギー出力の急激な変動に対する系統の周波数調整力の不足
- (3) 配電系統における電圧上昇
- (4) 単独運転と不要解列の防止

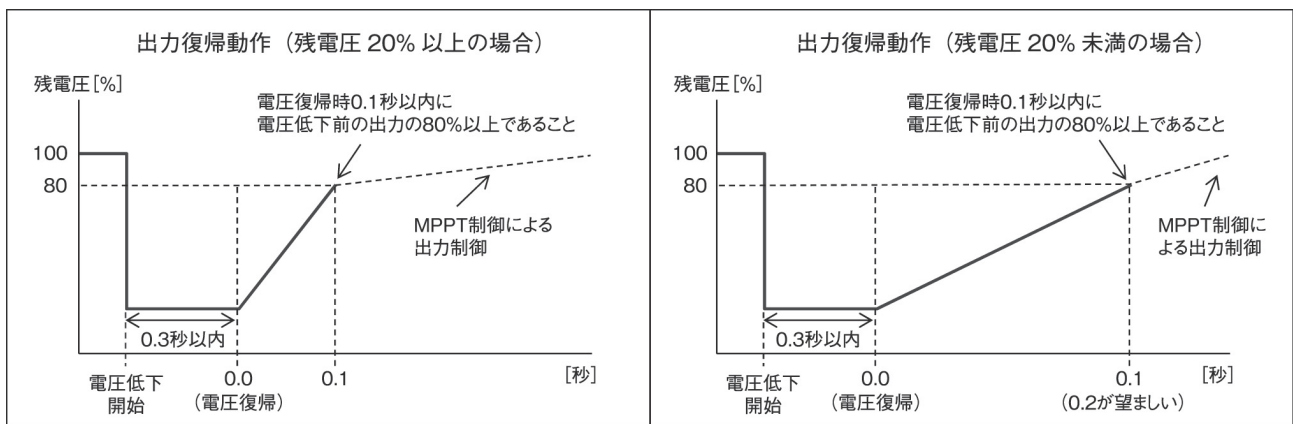
これらの中で、課題（4）については、PV-PCSに対し特に瞬間的な電圧低下（以下、瞬低）や周波数変動の影響で不要解列せずに運転を継続するFRT（Fault Ride Through）機能の搭載が要求され、国内では2014年4月から系統連系規程<sup>(2)</sup>に明記されている。FRT機能のうち、瞬低に対する運転継続機能はLVRT機能と呼ばれる。本稿では、PV-PCSのLVRT機能についてその背景を解説し、国内の連系要件に適合したLVRT機能の開発検証結果と、中国において国家电网が実施するより厳格なLVRT認定試験<sup>(3)</sup>を受験した結果について報告する。

\* 研究開発本部  
\*\* 新エネルギー・環境事業本部

## 2. LVVRT機能の背景

太陽光発電の大量導入時において、雷撃などが引き起こす瞬低により太陽光発電設備が電力系統から一斉に解列すると、電力系統の安定運用（周波数安定性、同期安定性、電圧安定性 等）に支障をきたす可能性が指摘されている<sup>(1)</sup>。そのため、電力系統の電圧・周波数の乱れに対して、解列せずに運転を継続し、系統の安定性維持に貢献する機能が太陽光発電設備に望まれる。図1に系統連系規程<sup>(2)</sup>に明記されている瞬低時のLVVRT要件を、表1にLVVRT要件の暫定・最終要件の比較を示す。表1から、PV-PCSのLVVRT機能について以下の性能が望ましい。

- (1) LVVRTレベル  
最終要件 20% となっているが、瞬低時の系統残存電圧が0%でも運転継続が望ましい
  - (2) 瞬低発生時・継続時  
瞬低発生時、継続時ともゲートブロックせず運転を継続すること。
  - (3) 瞬低回復時  
過電流・過電圧を発生させず、瞬時に出力を回復することが望ましい。
- そこで、国内のみならず、海外における連系要件への適合を狙い、上記の理想的なLVVRT機能を搭載したPV-PCS (250kW出力) を開発した。以下その機能・性能の詳細について述べる。



高圧配電線との連系要件、三相太陽光発電設備の電圧低下時の FRT 要件、出力復帰動作で、2017年4月から連系するもの（最終要件）

図1 太陽光発電設備のLVVRT要件のイメージ

表1 LVVRT要件における暫定・最終要件の比較、強化ポイント

要件項目 連系規程要件	LVVRTレベル (PVが停止してはならない残存電圧の値) [%]	PVが停止する瞬低継続時間 [秒]	残存電圧レベル ≥ LVVRTレベル		残存電圧レベル < LVVRTレベル	
			瞬低発生時・継続時	瞬低回復時	瞬低発生・継続時	瞬低回復時
暫定要件 (2017年3月までに連系する設備に適用)	30	0.3	ゲートブロックせず 運転継続 (詳細) ・発生直後2サイクル以内のゲートブロックは許容 ・継続時可能な範囲で力継続が望まれる	PV80%出力復帰まで0.5秒以内 (詳細) ・復帰直後2サイクル以内のゲートブロックは許容 ・復帰時に過電流発生無し	運転継続またはゲートブロック	PV80%出力復帰まで1秒以内
最終要件 (2017年4月から連系する設備に適用)	20		ゲートブロックせず 運転継続 (詳細) ・発生時ゲートブロックしないことが望まれる ・瞬低継続時可能な範囲で出力継続が望まれる	PV80%出力復帰まで0.1秒以内 (詳細) ・ゲートブロックしないことが望まれる ・復帰時に過電流発生無し		PV80%出力復帰まで1秒以内 (詳細) ・0.2秒以内に出力復帰することが望まれる

太字部分：暫定要件から最終要件に対して強化される内容を示す。

### 3. 理想的なLVRT要件への対応と検証(その1)

#### 3.1 PV-PCSのLVRT対策概要

図2に開発したPV-PCSの外観写真、図3に内部構成・制御ブロックを示す。LVRT要件に対して、弊社の250kW PV-PCSをベースに以下の対策(1)、(2)を施した。

- (1) PCS出力電流の維持(通常運転時及びLVRT期間中)
 

瞬低期間中も出力電流の大きさを一定にするためには、電流指令値振幅を瞬低発生前と同じレベルにすることが有効である。リミッタを用いてLVRT期間中も指令値振幅を通常運転と同じレベルになるよう一定制御するようにした。



図2 250kW PV-PCSの外観

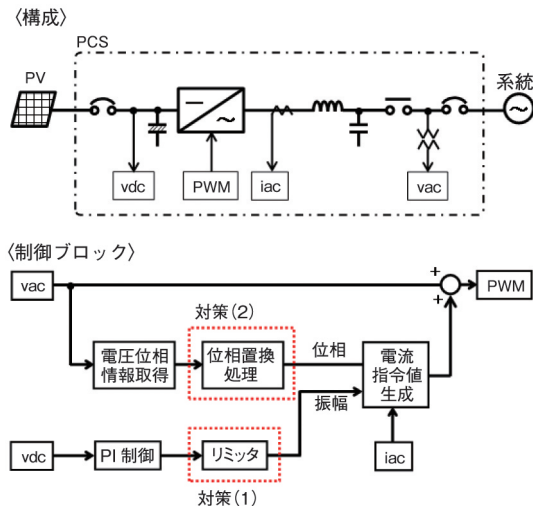


図3 内部構成と制御ブロック

- (2) 瞬低発生および復帰時の出力電流過渡現象の抑制
 

瞬低発生及び復帰時に、PV-PCSの出力電力急変によって交流側電圧・電流に過渡的な波形歪みが

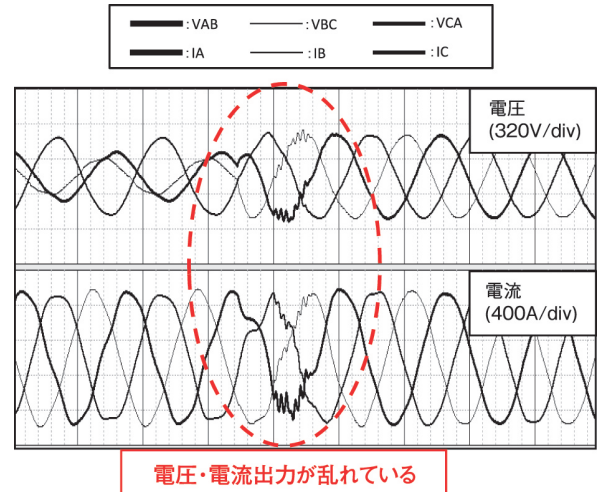


図4 LVRT動作時の過渡的な波形歪みの例(瞬低復帰時)

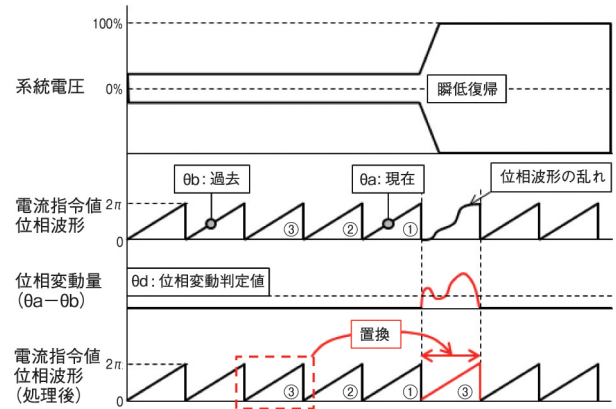


図5 LVRT位相置換処理(瞬低復帰時)

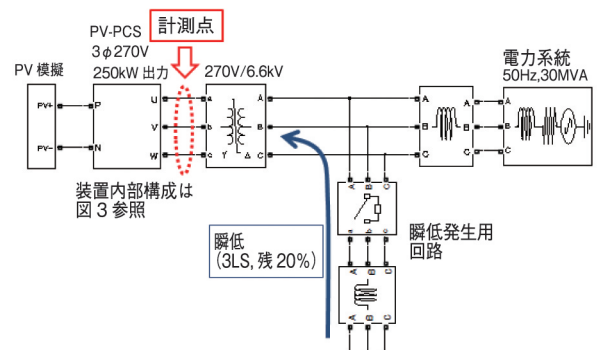


図6 シミュレーションモデル (matlab/simulink)

生じる(図4)。これを防止するためには、交流電圧から生成する電流指令値(位相)の乱れを抑制することが有効である。そこで図5のように、位相信号(図では $\theta_a$ )の乱れを検出したら即座に過

去の乱れのない位相信号（図では $\theta b$ ）に置き換えること（以下、LVRT位相置換処理）で、出力電流の過渡的な波形歪みを抑制するようになった。手法の有効性を確かめるため、シミュレーション検証にて効果を確認した。図6にmatlab/simulinkにて構成したシミュレーションモデルを示す。モデルの回路は中国国電網が実施する認定試験回路を想定して構成した。

3LS、残20%の瞬低に対し、PV-PCSのLVRT動作波形（図7）のうち、瞬低発生直後に電圧波形に高周波振動を伴った歪みが発生している。これに伴い、電流指令値も乱れ、電圧・電流波形の歪みが継続している。一方、LVRT位相置換処理を用いて電圧波形の歪みによる位相波形の歪みを除去すると、PCSの出力電流波形の歪みが無くなり、電圧波形と共に歪みの継続が無くなることを確認した（図8）。

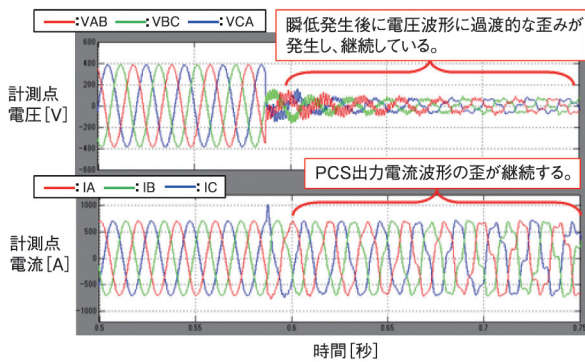


図7 LVRT動作波形（対策前）

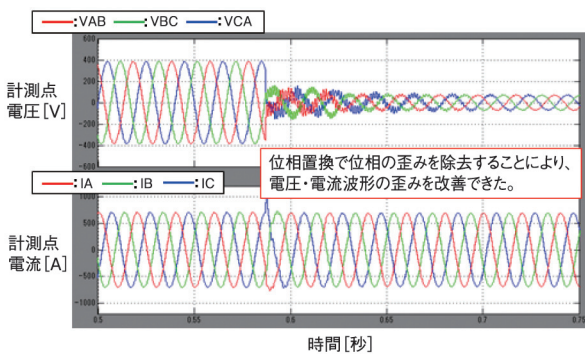


図8 LVRT動作波形（対策後）

### 3. 2 模擬系統構成とLVRT検証結果

中国の認定試験回路を想定し、本社社内で構成したLVRT試験回路を図9に示す。模擬系統として30MVAの短絡発電機（50Hz）を用い、短絡故障模擬SWを投入して三線短絡させ、リアクトルの分圧で瞬低（残電圧20%）を発生する構成とした。LVRT機能を搭載したPCS試作機を接続し、瞬低時のLVRT機能を評価した。図10のように定格ベースで残電圧20%、継続時間1.0秒の瞬低（3LS・2LS）を発生させた。図11に2LSの試験結果例を示す。PCSは停止せず運転継続し、三相ともバランスして常に一定レベルの電流を出力できることを確認した。また、回復時には電圧・電流波形から速やかに出力が回復していることを確認した。更に発生時・復帰時の電圧・電流についても、過渡的な波形歪みが小さいことを確認した。

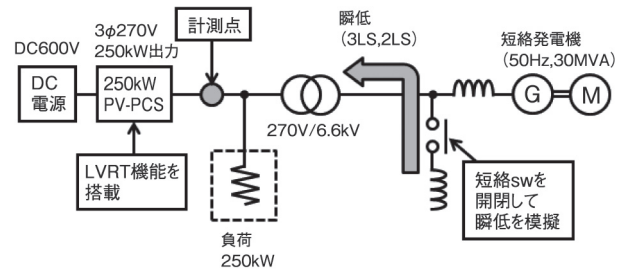


図9 LVRT試験回路

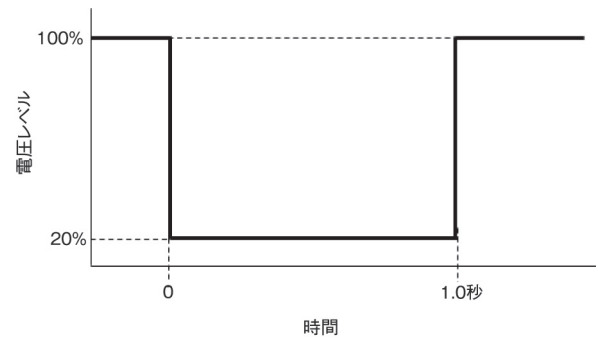


図10 瞬低試験の条件

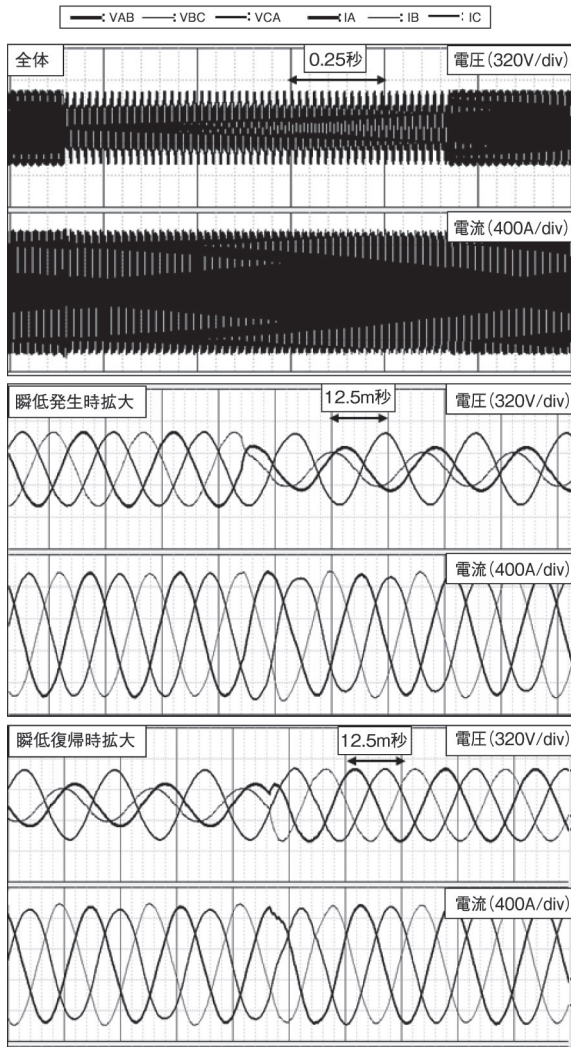


図11 試験結果例 (2LS、20%残電圧、1.0秒継続)

#### 4. 理想的なLVRT要件への対応と検証(その2)

##### 4. 1 残存電圧が0%付近である場合の対策

先に述べた第1段階の対策に加えて、更に系統電圧が低下してその位相情報が検出できない場合(残存電圧が0%付近の場合)について、図12のように即座にそれを以前の乱れのない位相情報に繰り返して置き換えること(以下、ZVRT (Zero Voltage Ride Through) 時の位相置換処理という)により、出力電流を安定化させることとした。これにより、系統電圧が0%付近でもPV-PCSが運転を継続するようにした。

##### 4. 2 ZVRT検証結果

図9と同様の試験回路において、定格ベースで残電圧0%、継続時間0.15秒の瞬低(3LS・2LS)を発生させた。図13に3LSの試験結果例を示す。残電圧20%の場合と同様、PCSは停止せず運転継続し、常に一定レベルの電流を出力できることを確認した。また、回復時には電圧・電流波形から速やかに出力が回復している。瞬低発生時・復帰時の電圧・電流についても、過渡的な波形歪みが小さくできることを確認した。

#### 5. 中国のLVRT認定試験受験

国内のLVRT要件よりも、瞬低時の電流出力の性能について厳格な認証試験が実施されている中国にて、国家能源太阳发电研发中心(略称NESC)が実施するLVRT認定試験を受験した。試験は図14の残電圧-継続時間の条件の瞬低をPCS試作機に入力し、その動作を評価する内容である。3LS、2LS等各種試験条件の組み合わせとして80パターンで実施した結果、合格することができた(2013年8月)。試験結果の一例<sup>(4)</sup>を図15に示す。社内試

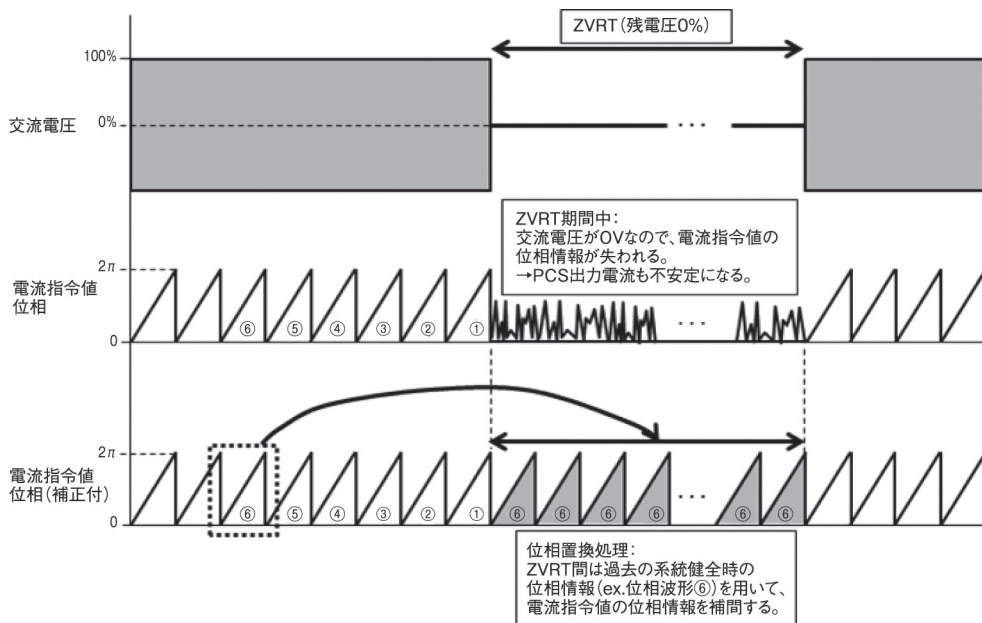


図12 ZVRT位相置換処理

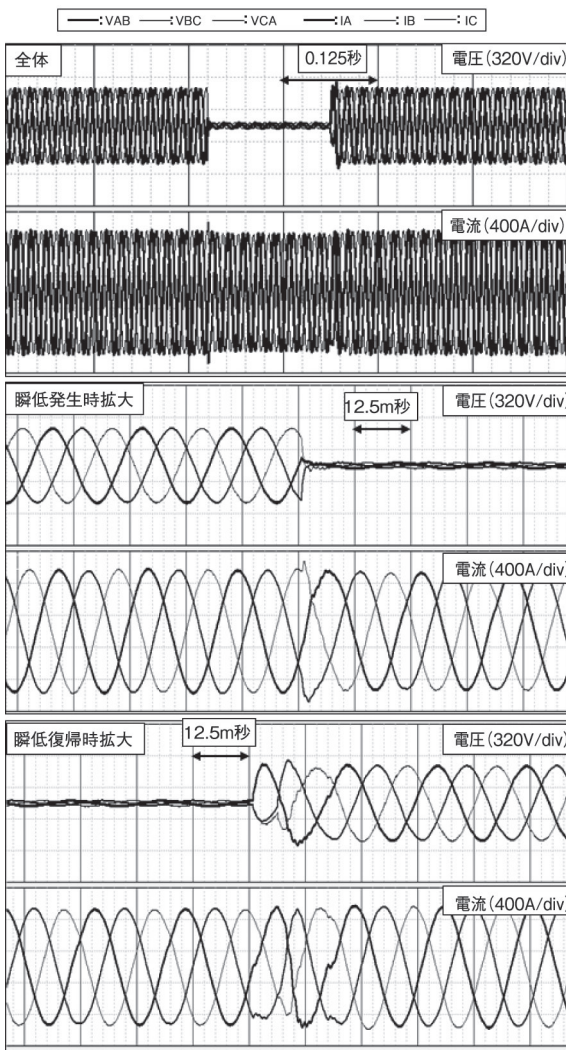


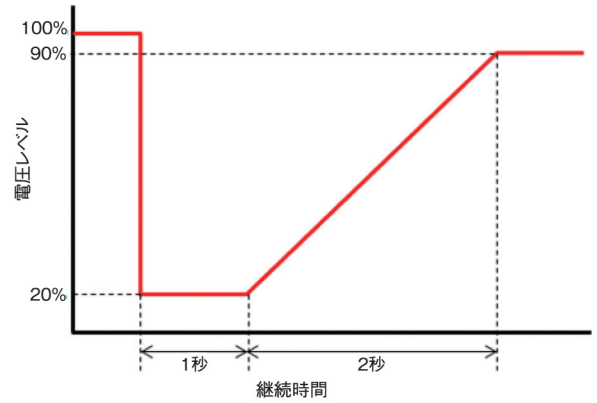
図13 試験結果例 (3LS, 0%残電圧, 0.15秒継続)

験と同様、PCSは運転継続し、瞬低発生時のPCS出力電流は歪むことなく安定して出力できていることを確認した。

## 6. おわりに

太陽光発電の大量導入時において、PV-PCSには瞬低などの系統擾乱時にも運転継続し、系統の安定性維持に貢献する機能が望まれる。これに対応して連系規程ではFRT要件が整備され、2014年度からは系統連系する全てのPV-PCSにその機能搭載が必須となった。また、諸外国においても同様にLVRT要件が整備されつつある。このような情勢を踏まえ、海外のLVRT要件適合を狙って残存電圧0%条件の瞬低にまで視野に入れたPV-PCSの開発を行い、発電機を用いた模擬瞬低試験結果によってその妥当性を確認した。

更に、海外への技術展開として、中国の国家电网によるより厳格なLVRT認定試験を受験し、合格することができた。



残電圧 [%]	継続時間 [秒]
90 ± 5	3.0 ± 0.02
80 ± 5	2.8 ± 0.02
60 ± 5	2.2 ± 0.02
40 ± 5	1.6 ± 0.02
20 ± 5	1.0 ± 0.02

図14 NESCのLVRT試験条件

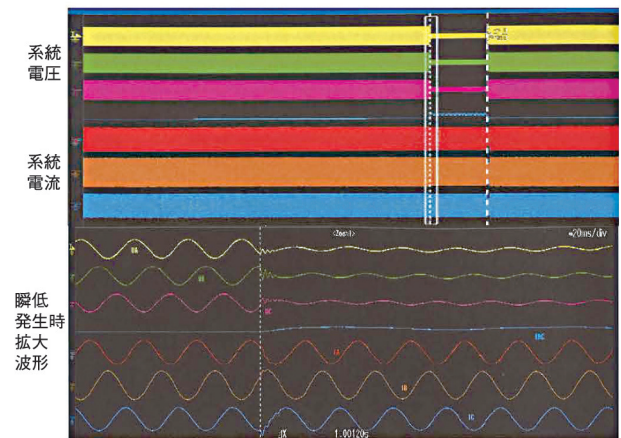


図15 試験結果例 (3LS, 20%残電圧)

## 参考文献

- (1) 経済産業省「次世代送配電ネットワーク研究会報告書」,11-15頁(2010年)
- (2) 日本電気協会「JEAC 9701-2012 系統連系規程」, 154-159頁(2012年)
- (3) Q/GDW 617-2011 “Technical rules for photovoltaic power station connected to Power Grid” (2011年)
- (4) 国家能源太阳能发电研发 (实验)中心、「検査報告PV20130381」(2013年)

執筆者紹介



宇田 怜史 Satoshi Uda  
研究開発本部 電力技術開発研究所  
電力機器・システム研究部  
制御開発グループ



羽田 儀宏 Yoshihiro Hada  
研究開発本部 電力技術開発研究所  
電力機器・システム研究部  
制御開発グループ長



西村 荘治 Shoji Nishimura  
研究開発本部 電力技術開発研究所  
電力機器・システム研究部 技師長  
博士(工学)



山田 真也 Shinya Yamada  
新エネルギー・環境事業本部  
新エネルギー事業部  
パワーコンディショナ部  
開発グループ



張 金林 Jinlin Zhang  
新エネルギー・環境事業本部  
新エネルギー事業部  
パワーコンディショナ部  
開発グループ



小林 猛 Takeshi Kobayashi  
新エネルギー・環境事業本部  
新エネルギー事業部  
パワーコンディショナ部  
開発グループ 主任



長谷部 孝弥 Takaya Hasebe  
新エネルギー・環境事業本部  
新エネルギー事業部  
パワーコンディショナ部  
開発グループ長



松川 満 Mitsuru Matsukawa  
新エネルギー・環境事業本部  
新エネルギー事業部 主幹  
技術士(電気・電子)