Experimental Evaluation of DG's Dynamic Voltage Support Capability Improving Short-Term Voltage Stability on Power System Loads

Tomoyuki Ueda Member (Hokuriku Electric Power Company, ueda.tomoyuki@rikuden.co.jp)

Shintaro Komami Member (Hokuriku Electric Power Company, komami.shintaro@rikuden.co.jp)

Keywords: power system, short-term voltage stability, voltage sag, distributed generation, low voltage ride-through, dynamic voltage support

Retirement of aged thermal generations causes increase of electric distance from total generation to total load. In this situation, high DG (Distributed Generation) penetration may cause serious stability problems on power system. The authors have presented that high DG penetration could lead to short term voltage instability of load in bulk power system and DG's Dynamic Voltage Support (DVS) capability could prevent the instability by simulation methods, which considered load branch impedance and load's dynamic behavior. However, experimental evaluation of the capability doesn't exist yet.

This paper presents the effect of DVS capability of DG on an experimental set up, which consists of an induction motor, a resistance load, and a compensation capacitor behind a series reactance as shown in Fig. 1. Response of a DG whose active and reactive power output are controlled corresponding to its terminal voltage is shown in Fig. 2. Character of reactive power is very like to that of SVC, and active power is controlled as a constant impedance to avoid over current in low voltage. By using voltage sag generator, the various tests confirm that the DG successfully realizes low voltage ride through (LVRT) capability and PQ control ensuring DVS capability.

Figure 3 shows the results of voltage sag tests using three types of DGs as follows.

Type1: drops due to voltage sag

Type2: has only LVRT capability

Type3: has LVRT + DVS capability

Type2 is stable in case of fault duration time $\Delta t = 100$ ms and depth of voltage sag $\Delta V = 70\%$ in Fig. 3(a), and it is unstable in case of $\Delta t = 70$ ms and $\Delta V = 100\%$ in Fig. 3(b). Voltage recovery of type3 is faster than that of type2 as shown in Fig. 3(a). According to experimental results, type3 is even stable in case of $\Delta t = 300$ ms and $\Delta V = 100\%$, and DVS capability can greatly improve short-term voltage stability of power system load.

Figure 4 shows the results of DG output of type3 in case of $\Delta t = 70$ ms and $\Delta V = 100\%$. The black line in Fig. 4(a) shows PQ reference corresponding to measured voltage. Good agreement with black line and PQ output means that DG inverter realizes adequate PQ control as shown in Fig. 2. In Fig. 4(b), DG current is within 150% of rated current, which is permissible range of short term over current. This paper also points out that the experimental results give good agreement with simulation and analysis using torque-speed curve of induction motor.

Fig. 1. Schematic diagram of experimental circuit

Fig. 2. PQ control method of DG

Fig. 3. Different load stability due to different DG control

Fig. 4. Output of DG with DSV ($\Delta t = 70$ ms, $\Delta V = 100\%$)

系統負荷の短時間電圧安定性を改善する分散型電源の動的電圧維持機能の実験的評価

正 員 上田 智之* 正 員 駒見慎太郎*

Experimental Evaluation of DG's Dynamic Voltage Support Capability Improving Short-Term Voltage Stability on Power System Loads

Tomoyuki Ueda*, Member, Shintaro Komami*, Member

High DG penetration will seriously spoil short-term voltage stability of load in bulk power system. Simulation results on previous studies by the authors have shown that dynamic voltage support (DVS) capability of DG improves the stability, but experimental evaluation doesn't exist yet. This paper presents the effect of DVS capability of DG on an experimental circuit, which consists of an induction motor, a resistance load, and a compensation capacitor behind a reactance. First, an experimental set up that causes voltage instability without DVS is made up. Second, an improvement in DG inverter control is made to realize low voltage ride-through (LVRT) capability and DVS capability, and the DG's performance is confirmed by voltage sag tests. Finally, the tests on the experimental set up demonstrate that DVS capability improves greatly short-term voltage stability of power system loads, and the experimental results give good agreement with simulation results.

キーワード：電力系統，短時間電圧安定性，瞬時電圧低下，分散型電源，低電圧乗り切り，動的電圧維持

Keywords: power system, short-term voltage stability, voltage sag, distributed generation, low voltage ride-through, dynamic voltage support

1. まえがき

近年，大規模電源の増大，老朽化火力の廃止により電源と負荷の電氣的距離がますます遠くなる傾向にある。このような状況において，分散型電源（DG）の導入が進むと，負荷の短時間電圧安定性^{(1)~(3)}が低下し，上位系統への影響も無視できなくなることが懸念される。著者らはこれまでに，系統故障などに起因する瞬時電圧低下（瞬低）により，負荷の短時間電圧不安定現象⁽³⁾や上位系統の発電機脱調現象⁽⁴⁾⁽⁵⁾が発生する可能性を示してきた。またその対策として DG が動的に電圧を維持する DVS（Dynamic Voltage Support）機能を備えていれば，これらの不安定現象が回避できることをシミュレーションにより示した。今後，DVS 機能を備えた DG を実際の系統に導入していくためには，シミュレーションのみならず，主要因である負荷の短時間電圧不安定現象を実験で再現し，DG の DVS 機能の効果を検証しておくことが重要となる。

近年においては，自励式素子によるインバータの普及が進み，インバータ制御の設計次第では DVS 機能を備えた DG の実現は可能であると考えられる。しかし，現在，下位系統に設置されるインバータ連系の DG は系統安定化効果を期待されていないため，系統故障除去直後に効果的に DVS 機能を発揮する DG は開発されていない。インバータ装置で DVS 機能を実現するためには，①瞬低でも運転継続する LVRT（Low Voltage Ride-Through）機能を持つこと，②DVS 機能の追加に伴い許容過電流を超過しないことが大切であり，これらに留意した設計や性能試験を行っておくことが必要となる。

本論文では，DVS 機能付きインバータ連系装置を製作し，実験にてその効果を検証した結果を示す。まず，誘導機のトルク-速度曲線とシミュレーションにより，DG を考慮した負荷の短時間電圧安定性を検討する。これより，DVS 機能の効果を検証する実験回路の短時間電圧安定性を把握する。次に，提案する制御方法を実現するインバータ連系装置の概要とその単体試験結果について述べる。特に，LVRT 機能を実現していること，短時間許容過電流内で DVS 機能のために適切な有効電力・無効電力制御を実現していることを示す。そして，DG と誘導機を含む実験回路にて負荷の短時間電圧不安定現象を再現し，DG の DVS 機能の追

* 北陸電力（株）技術開発研究所
〒930-0848 富山市久方町 2-54
Engineering Research & Development Center, Hokuriku Electric Power Company
2-54, Hisakatamati, Toyama 930-0848

加によって大幅にその安定性が改善されることを示す。

2. DG を考慮した負荷の短時間電圧不安定現象

著者らは、これまでに基幹系統から下位系統を含む大規模系統について、負荷までのインピーダンスを考慮する Y 結線縮約法を適用すると、系統によっては発電機内部～負荷端子までの電氣的距離が非常に遠くなり、負荷の短時間電圧不安定現象が発生することを示している⁽³⁾。また、この中で、系統状態や定インピーダンス (Z) 負荷を考慮し誘導機 (IM) 負荷のトルク-速度曲線を描くことで、負荷の短時間電圧安定性を評価する方法も示している。この方法を利用し、無限大母線～負荷端子までの電氣的距離が非常に遠い大規模系統において、定 Z 負荷と IM 負荷に DG が追加された図 1 のような状態を想定する。ここで、 V_G は無限大母線電圧、 V_{LT} は負荷端電圧、 X_S は無限大母線から負荷端子までのリアクタンス、 X_{LZ} は定 Z 負荷のリアクタンス、 X_{LM} は IM 負荷のリアクタンス、 R_{LZ} は定 Z 負荷の抵抗、 R_{IM} は IM 負荷の抵抗、 P_{LM} は IM 負荷の消費有効電力、 P_{LZ} は定 Z 負荷の消費有効電力、 P_{DG} は DG の有効電力出力、 B_C は補償用コンデンサのサセプタンス、 G_{DG} は DG のコンダクタンス、 B_{DG} は DG のサセプタンスを表す。また、DG については下記に示すような 3 種類が運転した場合について考える。

Type1: 瞬低により停止

Type2: LVRT 機能のみ

Type3: LVRT 機能 + DVS 機能

本論文では DG の有効電力出力は、系統電圧に対して 2 乗特性を持つマイナスの負荷とし、Type2 の LVRT 機能のみの場合は、一定のマイナス抵抗とする。Type3 の DVS 機能は (1) 式のようなサセプタンス B_{DG} で表現する。

$$B_{DG} = G_{DG} \left(1 - (V_{LT}/V_{LT0})^{10} \right) \dots\dots\dots (1)$$

表 1 の系統状態において、IM のトルク-速度曲線を求めた結果を図 2 に示す。表 1 において、 ω_0 は IM の定格回転数、 ω は回転数、 R_{IM0} 、 V_{LT0} はそれぞれ R_{IM} 、 V_{LT} の定常状態での値を示す。特に、Type3 の DVS 機能を有する場合については、ニュートン法に準ずる方法により収束計算を

行った。図 2 の縦軸は IM の電氣的トルク T_e から機械的トルク T_m を差し引いた値であるが、減速時に $T_m > T_e$ となれば IM はストールに至る。Type1 や Type2 のように DVS 機能がない場合は、IM の回転速度が 80% 程度で IM は不安定になり、Type3 のように DVS 機能がある場合は回転速度が 60% 程度まで低下してもストールに至らない。図 3 に表 2 の IM 定数を用いて故障除去時間 100 ms、電圧低下率 100% の故障を与えた場合のシミュレーション結果を示す。

表 1 系統の諸定数

Table 1. Power system condition (p.u., 10kVBase).

(a) $V_G = 1.02$, $V_{LT} = 0.99$, $X_S = 0.30$, $P_L = P_{LM} + P_{LZ} = 1.5$, $P_{LM} / (P_{LM} + P_{LZ}) = 0.6$, $P_{DG} = -0.4$ $B_C = 0.3814$, $R_{IM0} = 1.0503$, $R_{LZ} = 1.5754$, $X_{LZ}/R_{LZ} = X_{LM}/R_{IM} = 0.18/P_L$, $\omega_0 = 0.970$, $T_m \propto \omega^2$
(b) Type1: $G_{DG} = 0.0$, $B_{DG} = 0.0$, ($V_{LT} = 0.9186$) Type2: $G_{DG} = -0.4081$, $B_{DG} = 0.0$ Type3: $G_{DG} = -0.4081$, $B_{DG} = G_{DG} (1 - (V_{LT}/V_{LT0})^{10})$

図 2 異なる DG 制御による誘導機トルク-速度曲線
Fig. 2. IM torque-speed curves by different DG control.

表 2 IM の諸定数

Table 2. Parameters of induction motor (p.u., machine base).

Magnetizing reactance $X_m = 2.3$,
Resistance $R_1 = R_2 = 0.03$,
Leakage reactance $X_1 = X_2 = 0.1$,
Unit inertia constant $M = 0.5(s)$,
Loading = 1.0 (rated kW base)

図 3 異なる DG 制御による負荷の安定性
Fig. 3. Different load stability by different DG control.

図 1 DG を考慮した短時間電圧安定性解析モデル
Fig. 1. Model for short-term voltage stability analysis considering DG.

尚, シミュレーションには電中研 Y 法を使用した。Type1 や Type2 の場合, 負荷端の電圧は回復せず, IM の回転数は 80%程度まで低下した後, さらに回転数が低下していくことがわかる。Type3 の場合は, 電圧, IM の回転数ともに定常状態まで回復する。

以上, IM のトルク-速度曲線と Y 法シミュレーション結果から, 表 1 のような負荷 15 kW, うち誘導機負荷が 60%, DG 出力 4 kW, 上位系統のリアクタンス 0.30 (p.u.) 程度であれば, 負荷の短時間電圧不安定現象が再現でき, DG の DVS 機能の効果が検証できると考えられる。次章では, 表 1(b) にほぼ近い特性を示すインバータ連系装置を実際に製作する。

3. DVS 機能付きインバータ連系装置

〈3・1〉 作成した装置の概要 本論文で対象とする分散型電源の種類として, 三相で連系し, 瞬低発生時に発電側のエネルギー抑制がある程度可能なもの(二次電池, 燃料電池, 太陽光発電など)を想定した。瞬低中のエネルギー抑制が困難な風力発電などは, 別途, エネルギー蓄積用の装置の検討が必要となる。ここで, 図 4 に示すような制御を行う市販の連系インバータ装置をベースとした。この装置は太陽光発電用に製作されたもので昇圧チョッパ, 連系インバータからなり, 3 相 200 V で商用電源に連系し, インバータの定格出力は 4 kW である。特に, 灰色で囲んだ部分で系統電圧に対する P, Q 値を与えるよう制御プログラムのみを変更し, DVS 機能の追加を試みた。

表 1(b) の Type3 の出力制御をインバータで行う場合, 有効電力については, 系統電圧 V の 2 乗に比例した (2) 式の制御を行うことになる。無効電力については, (1) 式のサセプタンス B_{DG} に系統電圧 $V (= V_{LT}/V_{LT0})$ の 2 乗を掛ければ, 先の論文^{(3)~(5)}で示したような (3) 式の制御になる。ここで, W は定格出力 (kW) を示す。

$$P = WV^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$Q = W(V^2 - V^{12}) \dots\dots\dots (3)$$

(2), (3) 式を参考にして, 本論文において実際に行った DG 制御方法を図 5 に示す。ここで, 下記のような点について留意し, 制御の設計を行った。

(1) 汎用インバータは 150% 1 分間程度の過電流耐量を持つことから, 今回, 短時間許容過電流 (数秒オーダー) の目安を 150% とし設計を行った。実際に, 過電流耐量が小さいインバータに対しては, その範囲内での制御設計が必要になる。

(2) 常時の運転電圧では定格または最大出力で運転するものとし, 系統擾乱時の大幅な電圧低下時のみ有効電力を抑制し, 電圧上昇時には有効電力にリミッタを設けた。

(3) 瞬低による負荷脱落などの影響で, 故障除去後に系統電圧が過渡的に上昇する可能性がある⁽³⁾。そのため, 無効電力制御により故障除去後の電圧上昇を許容過電流範囲内で極力抑制するようにした。

(4) 定常状態で過敏に無効電力制御を行わないために不感帯を設けた。

(5) 系統電圧がほとんどない状態では位相検出が困難になり運転継続が難しくなるため, 出力を一旦停止することとした。ここで, 瞬低発生前後で系統周波数はほとんど変化しないため, 瞬低発生直前の周波数を保持して瞬低中も位相を計算しておき, 電圧復帰直後にはインバータを即時に出力できるように設計した。今回は, 系統電圧 20% 以

図 5 DG の PQ 制御方法
Fig. 5. PQ control method of DG.

図 4 インバータ制御ブロック図
Fig. 4. Schematic diagram of DG inverter control.

図 6 DG 出力の瞬時値波形

Fig. 6. Instantaneous value waveform of DG output.

下で出力を一旦停止し、系統電圧 30%以上となった場合に出力を再開するようにした。

市販の連系インバータ装置について補足すると、瞬低時に、直流側の電圧は昇圧チョップの制御遅れなどにより若干上昇するが、100 ms 程度であれば平滑化直流コンデンサ (3000 μ F) により一定 (目標値 365 V に対し 104%以内) になるように設計されている。また、受動型単独運転防止装置の電圧位相跳躍検出が装備されていたが、不平衡故障時や三相電圧がゼロに近い場合に、瞬時に位相急変を検出し解列するようになっていたため、これをロックし実験を行った。

〈3・2〉 瞬低発生装置を用いた運転性能の確認 電力回生機能付き瞬低発生装置⁶⁾を用いて、電力系統で発生する瞬低現象を再現し、インバータ連系装置の運転性能を確認した。図 6(a) に電圧低下率 70%、継続時間 100 ms の瞬低試験の結果を示す。この場合は、瞬低中でも DG の出力電流は継続しており、運転継続している。図 6(b) に示すように電圧低下率 100%、継続時間 100 ms の瞬低試験の結果では、出力電流を一旦停止し、電圧復帰後、約 1 サイクル程度で DG は出力を再開している。これは、系統電圧 20%以下で出力を一旦停止するという設計によるものである。電圧検出とインバータ制御の遅れの影響で出力再開が 1 サイクル程度遅れるが、DG によって故障除去後数百 ms での系統安定化効果を期待すればよいことから、LVRT 機能としては許容できる範囲である。

次に、電圧に対する DG の PQ 出力値を確認するために、

図 7 電圧変化に対する DG の PQ 出力

Fig. 7. PQ output of DG due to voltage variation.

図 8 瞬低による DG の電流 (瞬時値)

Fig. 8. DG current due to voltage sag (instantaneous value).

瞬低復帰時の電圧回復を 0 から 1.11 (p.u.) まで 700 ms で線形に変化させた場合の DG 出力を図 7 に示す。若干の制御遅れはあるものの出力設定値 (黒線) とほぼ同等の値が出力されており、作成したインバータ装置で設計した特性 (図 5) が実際に得られている。この時の DG の電流 (瞬時値) を図 8 に示す。ここで、設計した有効・無効電力制御による DG の出力電流は、短時間許容過電流の目安とした定格電流の 150%以内となっている。

4. 模擬システムを用いた DVS 機能の実証試験

〈4・1〉 DG による DVS 機能の効果 DVS 機能の効果について、IM を含む模擬システムで確認するために、図 9 のような実験回路を構成する。ここで、各機器の定数 (表 3 参照) は、2 章において検討した系統モデル相当の値とし、10 kVA をベースとして負荷が 1.5 (p.u.)、うち IM 負荷が 60%、DG 出力が 0.4 (p.u.)、系統リアクタンスが約 0.32 (p.u.) である。

図 9 の実験回路において、電圧低下率 100%、継続時間 70 ms の瞬低を発生させた場合の実験結果とシミュレーション結果を図 10 に示す。DG の制御は 2 章と同様に Type1 ~ Type3 の 3 通りとした。図 10(a-1) では、Type1 の DG が運転停止に至る場合や Type2 の LVRT 機能のみの場合は、負荷端の端子電圧は 0.4 (p.u.) 程度で低下したままであり、回復しない。これに対し、Type3 の DG が LVRT 機能と DVS 機能を持つ場合は、1 秒以内に電圧が回復している。図 10(b-1) では、Type1 や Type2 では瞬低回復後も回転数は低下し続け、Type3 では IM の回転速度 78%程度まで低

図 9 実験回路の概要図

Fig. 9. Schematic diagram of experimental set up.

表 3 実験回路の諸定数

Table 3. Parameters of experimental set up.

(a) Impedance (p.u., 10kVA, 200V base)	
Reactor1	$0.017 + j0.118$
Reactor2	$0.040 + j0.205$
(b) Load (p.u., 10kVA, 200V base)	
Resistance load	0.60
IM load 1	$0.75 + j0.35$
IM load 2	$0.15 + j0.08$
DG	-0.40
Capacitor	$-j0.61$
(c) IM load parameter (p.u., machine base)	
(IM load 1)	
$X_1 = X_2 = 0.091, X_m = 4.58, R_1 = 0.028, R_2 = 0.054,$	
$M = 0.47(s), T_m \propto \omega^2, \text{Loading} = 1.0 \text{ (rated kW base)}$	
(IM load 2)	
$X_1 = X_2 = 0.093, X_m = 1.95, R_1 = 0.039, R_2 = 0.060,$	
$M = 0.61(s), T_m \propto \omega^2, \text{Loading} = 1.0 \text{ (rated kW base)}$	

下後、定常状態に回復する。図 10(a-2), (b-2) ではシミュレーション結果を示す。負荷端電圧, IM の回転数ともに実験結果とほぼ一致している。

Type2, Type3 のケースにおける負荷の有効・無効電力の実験結果とシミュレーション結果を図 11 に示す。図 11(a-1)

図 10 異なる DG 制御による負荷の電圧安定性 ($\Delta t = 70 \text{ ms}$, $\Delta V = 100\%$)

Fig. 10. Load's voltage stability by different DG control.

図 11 瞬低による負荷の有効・無効電力

Fig. 11. Active and reactive power of load due to voltage sag.

図 12 瞬低による DG の有効・無効電力

Fig. 12. Active and reactive power of DG due to voltage sag.

図 13 瞬低による DG の電流 (瞬時値, Type3)

Fig. 13. DG current due to voltage sag (instantaneous value, Type3).

は type2 の実験結果であるが、故障除去後、無効電力消費は増加したままとなる。これに対し type3 の実験結果である図 11(b-1) では、無効電力消費は 1 秒以内に定常状態に戻っている。Type2, Type3 のケースにおける DG 出力の実験結果とシミュレーション結果を図 12 に示す。ここで図中の黒線は、電圧値から換算した出力設定値を示している。図 12(a-1), (b-1) の実験結果では、ほぼ設定値どおりの DG 出力が得られている。図 11(a-2), (b-2), 図 12(a-2), (b-2) はシミュレーション結果を示す。瞬低による負荷の有効・無効電力, DG の有効・無効電力ともに実験結果とほぼ一致している。

図 13 には Type3 の DG の電流 (瞬時値) を示すが、有効・無効電力制御による電流値はインバータの短時間許容過電流の目安とした定格電流の 150% 以内である。

図 14 電圧低下率と故障継続時間による安定限界

Fig. 14. Stability limits due to depth of voltage sag and fault duration time.

図 15 異なる DG 制御による負荷の電圧安定性 ($\Delta t = 40$ ms, $\Delta V = 100\%$)

Fig. 15. Load's voltage stability by different DG control.

〈4・2〉 故障継続時間や電圧低下率による違い 図 14

に故障継続時間を 10 ms 毎, 電圧低下率を 10% 毎に変更して IM がストールに至らない安定限界を調べた実験結果を示す。この結果によれば, Type3, Type2, Type1 の順番で安定限界の範囲が広く, LVRT 機能と DVS 機能の効果を確認できる。特に, Type3 においては故障継続時間 300 ms, 電圧低下率 100% でも安定となった。

図 15 は, 前節における故障継続時間を 70 ms から 40 ms に短縮した場合 (電圧低下率は 100%) の結果である。図 10 の結果と比較すると, 図 15 では, Type2 でも安定となっていることがわかる。また, Type3 は Type2 よりも速く電圧が回復しており, DVS 機能の効果が確認できる。図 16 は, 前節における電圧低下率を 100% から 70% に小さくした場合 (故障継続時間は 70 ms) の結果である。図 10 の結果と比較すると, 図 16 では, Type3 に加え Type2 も安定となっている。Type2 は安定限界付近にあり, 故障除去後, IM の回転数は 80% 程度を 1 秒程度維持したままゆっくりと定常状態まで復帰している。この結果は, 図 2 の IM のトルク-速度曲線において Type2 の場合, IM の回転速度が 80% 程度で安定限界となる特性とほぼ一致している。

図 17 に, Type3 の場合について電圧低下率を 100%, 故

図 16 異なる DG 制御による負荷の電圧安定性 ($\Delta t = 70 \text{ ms}$, $\Delta V = 70\%$)

Fig. 16. Load's voltage stability by different DG control.

図 17 DVS 機能付き DG による負荷の電圧安定性 ($\Delta t = 100 \text{ ms}$, 200 ms , 300 ms , $\Delta V = 100\%$)

Fig. 17. Load's voltage stability by DG with DVS.

障継続時間を 100 ms から 300 ms まで長くした場合の結果を示す。故障継続時間が長くなったため電圧が回復する時間も長くなり、また IM の回転速度が 60% 以下になるものの、定常状態には復帰する。この結果は、図 2 の IM のトルク-速度曲線において、Type3 の場合、IM の回転速度が 60% 以下となっても安定となる特性とよく一致している。

5. あとがき

本論文において提案する有効・無効電力制御方法に基づく DVS 機能付きインバータ連系装置を製作し、瞬低試験により下記のことを示した。

(1) 市販のインバータ連系装置のプログラム変更のみにより LVRT 機能と DVS 機能を実現できることを確認した。特に、提案する制御方法は、短時間の過電流が定格電流の 150% 以内に収まるため、現状のインバータ容量を過度に大きくすることなく実現できると考えられる。

(2) DG と IM を含む試験回路において、DVS 機能がない場合は負荷の短時間電圧不安定現象が発生し、DVS 機能により安定となることを実験で示した。これらは、IM のトルク-速度曲線から求められる特性やシミュレーション

結果とほぼ一致することを示した。

(3) DG の DVS 機能により、IM の電氣的トルクが大きくなるために、IM は回転速度が低下しても定常状態に復帰できる。この機能により、瞬低に対して大幅に負荷の短時間電圧安定性が改善され、瞬低継続時間が長く電圧低下量が大きくても安定に定常状態に復帰できることを実験で示した。

今後の課題としては、①実系統における DG は多台数で構成されているため、制御のばらつきや相互干渉の影響を数台単位で実験的に評価すること、②瞬低中のエネルギー抑制が困難な風力発電などで LVRT 機能と DVS 機能を実現することが挙げられる。

本論文で示した実験結果は著者らの大規模系統でのシミュレーション結果⁽³⁾⁻⁽⁵⁾を裏付けており、今後導入される DG (特にインバータ連系 DG) は LVRT 機能と DVS 機能を備える必要があると考える。インバータ連系 DG は、特別高圧に連系されるものから低圧に連系されるものまで多岐にわたり、全てのインバータ DG についてそれらの機能が必要か否かは、今後の DG 導入量や電力系統側の増強状況による。しかし、少なくとも本論文で示したような不安定現象が発生する可能性があることを認識した上で、系統計画・運用を行っていくことが重要であると考えられる。

本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO 技術開発機構) からの委託事業 (「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」新型蓄電池の実用化技術開発) の一環として行われたものである。

(平成 19 年 8 月 24 日受付, 平成 19 年 12 月 17 日再受付)

文 献

- (1) A.E. Hammad and M.Z. El-Sadek: "Prevention of Transient Voltage Instabilities due to Induction Motor Loads by Static Var Compensators", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.4, No.3, pp.1182-1190 (1989-8)
- (2) O.T. Tan, G.C. Paap, and M.S. Kolluru: "Thyristor-Controlled Voltage Regulators for Critical Induction Motor Loads During Voltage Disturbances", *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol.8, No.1, pp.100-106 (1993-3)
- (3) T. Ueda and S. Komami: "Dynamic Load Stability in Bulk Power System with High DG Penetration", *IEEJ Trans. PE*, Vol.127, No.2, pp.371-378 (2007-2) (in Japanese)
上田智之・駒見慎太郎:「分散型電源大量導入時における動的負荷の安定性解析」, 電学論 B, **127**, 2, pp.371-378 (2007-2)
- (4) T. Ueda and S. Komami: "Transient Stability Considering Dynamic Load in Bulk Power System with High DG Penetration", *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.10, pp.969-976 (2006-10) (in Japanese)
上田智之・駒見慎太郎:「分散型電源大量導入時における動的負荷を考慮した過渡安定度」, 電学論 B, **126**, 10, pp.969-976 (2006-10)
- (5) Y. Yamagishi and S. Komami: "Power System Dynamic Stability Analysis Considering Dynamic Load and Distributed Generation", *IEEJ Trans. PE*, Vol.126, No.10, pp.977-984 (2006-10) (in Japanese)
山岸良雄・駒見慎太郎:「動的負荷と分散型電源を考慮した電力系統の動態安定度解析」, 電学論 B, **126**, No.10, pp.977-984 (2006-10)
- (6) N. Kanao, M. Yamashita, H. Yanagida, G.S. Kim, and S. Kikuhara: "Development of Voltage Dip generator Instrument with Power Regenerative Function", *Proc. of the 13th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan*, Vol.A, pp.659-660 (2002-8) (in Japanese)
金尾則一・山下益功・柳田孫肖・金光 植・菊原 聡:「電力回生機能付き瞬低発生装置の開発」, 平成 14 年電気学会 B 部門大会, 分冊 A, pp.659-660 (2002-8)

上 田 智 之（正員） 1968 年 8 月 5 日生。1992 年 3 月慶應義
塾大学理工学部電気工学科卒業。1994 年 3 月同
大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修
了。同年 4 月北陸電力（株）入社。現在，同社技
術開発研究所勤務。

駒 見 慎太郎（正員） 1952 年 9 月 13 日生。1975 年 3 月東京
大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月北陸電力
（株）入社。現在，同社技術開発研究所部長。