階調制御型瞬低補償装置における相間エネルギー流用制御

正員 羽田野伸彦* 正員 山田 正樹**
正員 岩田 明彦** 正員 菊永 敏之**

Effective Operation Method of the Voltage Sag Compensator with Controlled Gradational Voltage by Interdependent Use of Capacitor Energy on Different Phase of a Power Line

Nobuhiko Hatano*, Member, Masaki Yamada**, Member,
Akihiko Iwata**, Member, Toshiyuki Kikunaga**, Member

This paper presents the effective operation method by interdependent use of capacitor energy on the new concept of voltage transient sag compensator. This compensator consists of the series connection inverter units, and each inverter unit generates a different output voltage by 2^n times. Namely, in this system, the compensation energy is accumulated in each inverter unit's capacitor charged with different voltage by 2^n times. The method proposed here, in any case of various levels of transient voltage sags on different phase of a power line, provides the effective use of capacitor energy of all these inverter units.

キーワード：瞬時電圧低下，階調制御電圧，直列補償，DVR，インバータ

Keywords: voltage sag, controlled gradational voltage, series compensation, DVR, inverter

1. まえがき

電力系統における瞬時電圧低下（以下，瞬低と略す）とは，系統事故が発生した場合に，それを検出し，しゃ断器で除去するまでの間に，負荷供給電圧が低下する現象である。ごく短時間の電圧低下であるが，生産ラインや情報機器などに深刻な被害を及ぼす⁽¹⁾。

瞬低を補償するにあたっては，停電対策のように大きな補償エネルギーが必要ないことから，専用の対策装置として，コンデンサをエネルギー源とした直列型瞬低補償装置がある。よく知られた直列型瞬低補償装置である DVR⁽²⁾（Dynamic Voltage Restorer）は，系統側での電圧低下分をインバータによる発生電圧で補償する装置である。この DVR で用いられているインバータには，大規模な平滑化フィルタや昇圧用変圧器が用いられている。

一方，筆者らが開発を進めている「階調制御電圧による瞬低補償装置」⁽³⁾⁽⁴⁾は，出力電圧の異なる複数のインバータを直列に接続し，高精度の近似正弦波の補償電圧を出力するという，新しいインバータ制御方式を取り入れた直列型

瞬低補償装置である。この「階調制御」によるインバータシステムでは，大規模な平滑化フィルタや昇圧用変圧器を省略することが容易になり，特に高電圧・大容量システムにおいて，従来装置と比べて大幅なコンパクト化・低コスト化が実現できる。

ところが，本装置を 3 相交流系統に適用する場合，単相用のシステムを各相に独立して設置することになる。したがって，3 相の補償電力が均等でない場合には，大きな補償電力を出力する相のコンデンサ電圧がいち早く低下し，他相にコンデンサ蓄積エネルギーの余裕を残したまま，瞬低補償電圧のピーク値を出力できなくなる。また，3 相交流系統においては，瞬低の原因は 1 相または 2 相の系統事故が約 8 割と⁽¹⁾ 大半を占める。このように，本装置は 3 相交流系統に適用すると，コンデンサ規模に対する瞬低補償時間の点で効率の良くない装置となる可能性がある。

本稿では，先の課題を解決するために考案した，いずれかの相に設置されたコンデンサの蓄積エネルギーを他相の瞬低補償エネルギーに流用する手法と，その実証試験の結果について報告する。

2. 階調制御電圧による瞬低補償装置

2.1 装置の概要 階調制御電圧による瞬低補償装置の構成例を図 1 に示す。装置は，インバータ，コンデンサ，充電装置，高速しゃ断器から成る。

通常時は高速しゃ断器を通じて負荷に電力供給する。この際，系統電圧を監視し，あらかじめ基準電圧を定めてお

* 関西電力（株）電力技術研究所
〒661-0974 尼崎市若王寺 3-11-20
The Kansai Electric Power Co., Inc.

3-11-20, Nakoji, Amagasaki 661-0974

** 三菱電機（株）先端技術総合研究所
〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

Advanced Technology R&D Center Mitsubishi Electric Corp.

8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

図 1 階調制御電圧による瞬低補償装置

Fig. 1. Voltage sag compensator with controlled gradual voltage.

図 2 各ユニットの動作タイミング

Fig. 2. Operational timing chart.

く。瞬低時には高速しゃ断器を開極し、インバータシステムより補償電圧を出力する。

本装置の特徴である、「階調制御」によるインバータシステムは、直流電源であるコンデンサの電圧が V_c , $2V_c$, $4V_c$, $8V_c$ のように、2 倍ずつ異なった値に設定されたインバータユニットを直列接続して構成される。以下では、直流電圧が $2^{j-1}V_c$ ($j = 1, 2, 3, 4$) のインバータユニットを特定する際には、 j 番目のインバータユニットと呼ぶ。

このインバータシステムを、図 2 に示すタイミングチャートのように動作させると、平滑化フィルタを用いることなく 16 レベルの高精度な交流電圧を出力できる。また、図 2 では全インバータユニットを動作させているが、実際には瞬低時の電圧低下レベルを検出して適切なユニットを動作させることにより、必要な補償電圧を出力する。

2・2 3 相交流システムへの適用にあたっての課題 図 3 のモデルで、1 相地絡、2 相地絡および 2 相短絡による瞬低が発生した場合の、事故点の電圧 V_f 、基準電圧 V_n 、変圧器一次側電圧 V_p 、瞬低補償装置の系統連系点の電圧（以下、系統電圧と略す） V_s の関係を、それぞれ図 4、図 5、図 6 に示す。

図 3 系統モデル

Fig. 3. Model system.

図 4 1 相地絡による瞬低時の系統電圧

Fig. 4. Voltage sag for 1 LG (1-line ground).

図 5 2 相地絡による瞬低時の系統電圧

Fig. 5. Voltage sag for 2 LG (2-line ground).

図 6 2 相短絡による瞬低時の系統電圧

Fig. 6. Voltage sag for 2 LS (2-line short).

なお以下では、交流電圧および交流電流を表すフェーザ表示は太字とする。 $e^{j\phi}$ は a 相基準電圧と位相差 ϕ の単位フェーザ、2 つのフェーザに対する演算子「 $\cdot$ 」はフェーザを複素平面上のベクトルと考えたスカラー積である。また電圧、電流については、[p.u.] 表示とする。

事故点の電圧 V_f と基準電圧 V_n が、系統インピーダンス αZ , $(1-\alpha)Z$ の比により分圧され、変圧器一次側電圧 V_p となる。変圧器を介することにより、 V_p の零相成分が除去された電圧が、系統電圧 V_s となる。

これらの瞬低を直列型瞬低補償装置で補償した場合、各相から系統に出力される補償エネルギーは、補償電圧と負荷電流からなる有効電力（以下、補償電力と略す）の時間積分値となる。図 3 のモデル、および図 4、図 5、図 6 において、各相毎に基準電圧 V_n と系統電圧 V_s の差分を出

力するように補償電力 V_i を出力すると、a 相、b 相、c 相の補償電力 P_{i_a} 、 P_{i_b} 、 P_{i_c} は、1 相地絡、2 相地絡、2 相短絡に対して、それぞれ (1) 式、(2) 式、(3) 式のようになり、いずれも相毎に異なる補償電力が必要となる。

$$[1LG] \begin{cases} P_{i_a} = \frac{2\alpha}{3} e^{j0} \cdot e^{j\phi} = \frac{2\alpha}{3} \cos \phi \\ P_{i_b} = \frac{\alpha}{3} e^{j\pi} \cdot e^{j(\phi - \frac{2\pi}{3})} = \frac{\alpha}{3} \cos \left(\phi + \frac{\pi}{3} \right) \\ P_{i_c} = \frac{\alpha}{3} e^{j\pi} \cdot e^{j(\phi + \frac{2\pi}{3})} = \frac{\alpha}{3} \cos \left(\phi - \frac{\pi}{3} \right) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$[2LG] \begin{cases} P_{i_a} = \frac{\alpha}{3} e^{j0} \cdot e^{j\phi} = \frac{\alpha}{3} \cos \phi \\ P_{i_b} = \left(\frac{\sqrt{3}\alpha}{2} e^{-j\frac{\pi}{2}} + \frac{\alpha}{6} e^{j\pi} \right) \cdot e^{j(\phi - \frac{2\pi}{3})} \\ = \frac{\sqrt{3}\alpha}{2} \cos \left(\phi - \frac{\pi}{6} \right) + \frac{\alpha}{6} \cos \left(\phi + \frac{\pi}{3} \right) \\ P_{i_c} = \left(\frac{\sqrt{3}\alpha}{2} e^{j\frac{\pi}{2}} + \frac{\alpha}{6} e^{j\pi} \right) \cdot e^{j(\phi + \frac{2\pi}{3})} \\ = \frac{\sqrt{3}\alpha}{2} \cos \left(\phi + \frac{\pi}{6} \right) + \frac{\alpha}{6} \cos \left(\phi - \frac{\pi}{3} \right) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

$$[2LS] \begin{cases} P_{i_a} = 0 \\ P_{i_b} = \frac{\sqrt{3}\alpha}{2} e^{-j\frac{\pi}{2}} \cdot e^{j(\phi - \frac{2\pi}{3})} = \frac{\sqrt{3}\alpha}{2} \cos \left(\phi - \frac{\pi}{6} \right) \\ P_{i_c} = \frac{\sqrt{3}\alpha}{2} e^{j\frac{\pi}{2}} \cdot e^{j(\phi + \frac{2\pi}{3})} = \frac{\sqrt{3}\alpha}{2} \cos \left(\phi + \frac{\pi}{6} \right) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

本装置を 3 相交流系統に適用する場合、図 1 に示すような単相用のシステムを各相に独立して設置する、すなわち補償エネルギー源であるコンデンサが各相に分散して割り当てられる。したがって、各相の補償電力が均等でない場合の瞬低補償においては、大きな補償電力を出力する相のコンデンサ電圧がいち早く低下し、他相に蓄積エネルギーの余裕を残したまま、瞬低補償に必要な電圧ピーク値を発生できなくなる。

系統事故の内、瞬低の原因となるものは 1 相または 2 相事故が約 8 割⁽¹⁾ を占める。したがって、本装置は 3 相交流系統に適用すると、コンデンサ規模に対する瞬低補償時間の点で効率の良い装置となりうる。コンデンサ規模は装置サイズやコストに大きなウエイトを占めるため、この課題を解決することは極めて重要である。

3. 相間エネルギー流用制御の開発

3.1 基本的考え方 ここでは 3 相交流系統におけるインバータ制御の自由度⁽⁵⁾ を活用し、いずれかの相に設置されたコンデンサの蓄積エネルギーを他相の補償エネルギーに流用することにより、3 相均等に補償エネルギーを出力できることを示す。

異なる相の間でコンデンサ蓄積エネルギーを流用できれ

ば、1 相もしくは 2 相の電圧低下を補償する場合でも、エネルギー蓄積源として 3 相分のコンデンサを用いることができるため、対応可能な瞬低補償時間（以下、補償可能時間と略す）の延長が期待できる。

図 3 の系統モデルで、負荷の線間電圧を維持するように瞬低補償を行うには、a 相、b 相、c 相のうち任意の k 相において、補償電圧 V_{i_k} 、基準電圧 V_{n_k} および系統電圧 V_{s_k} の間に、(4) 式の関係を満たせば良い。ここで、 V_o は任意であり、先のインバータ制御の自由度に相当する。

$$V_{i_k} = V_{n_k} - V_{s_k} + V_o \dots\dots\dots (4)$$

任意の k 相における補償電力 P_{i_k} は、基準電圧 V_{n_k} 、系統電圧 V_{s_k} 、負荷電流 I_k を用いて、(5) 式のように表される。

$$P_{i_k} = V_{i_k} \cdot I_k = (V_{n_k} - V_{s_k}) \cdot I_k + V_o \cdot I_k \dots\dots\dots (5)$$

3 相交流系統では負荷電流の 3 相和は 0 であるから、(5) 式の a 相、b 相、c 相に対応する 3 つの式の和をとることにより、(6) 式を導くことができる。(6) 式は V_o を用いても、補償電力の 3 相和は変化しないことを表す。

$$\sum_{k=a,b,c} P_{i_k} = \sum_{k=a,b,c} (V_{n_k} - V_{s_k}) \cdot I_k \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式の両辺に 1/3 を乗じて (5) 式より減じることににより、任意の k 相に対して、(7) 式が得られる。

$$P_{i_k} - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} P_{i_j} = \frac{2}{3} (V_{n_k} - V_{s_k}) \cdot I_k - \frac{1}{3} \sum_{j \neq k} (V_{n_j} - V_{s_j}) \cdot I_j + V_o \cdot I_k \dots\dots\dots (7)$$

3 相均等に補償電力を出力するには、(7) 式の左辺は 0 になることが必要である。また、3 相交流系統では負荷電流は概ね 3 相平衡であるため、負荷電流の振幅が 3 相いずれも 1 [p.u.] で、任意の異なる 2 相の負荷電流の位相差が $2\pi/3$ と近似すると、それらのスカラー積は $-1/2$ となる。このとき (7) 式は (8) 式のように変形できる。

$$0 = \left(\frac{2}{3} \sum_{j=a,b,c} [(V_{n_j} - V_{s_j}) \cdot I_j] I_j + V_o \right) \cdot I_k \dots\dots\dots (8)$$

(8) 式より、3 相均等に補償電力を出力するための V_o は (9) 式のようになる。(9) 式は、任意の系統電圧 V_s および負荷電流 I に対して、本装置が概ね 3 相均等に補償電力を出力できる V_o を示している。

$$V_o = -\frac{2}{3} \sum_{j=a,b,c} [(V_{n_j} - V_{s_j}) \cdot I_j] I_j \dots\dots\dots (9)$$

1 相地絡、2 相地絡、および 2 相短絡のそれぞれに対して、基準電圧と系統電圧のみを補償した場合と、(9) 式の V_o を用いた場合の比較を図 7、図 8、図 9 の左右の図に示す。

例えば、図 7 は、図 3 のモデルで a 相地絡による瞬低を

図 7 1 相地絡に対する系統電圧および Vo

Fig. 7. Vs, Vo for voltage sag by 1 LG.

図 8 2 相地絡に対する系統電圧および Vo

Fig. 8. Vs, Vo for voltage sag by 2 LG.

図 9 2 相短絡に対する系統電圧および Vo

Fig. 9. Vs, Vo for voltage sag by 2LS.

補償した場合を表している。左図は基準電圧 V_n と系統電圧 V_s の差分のみを補償した場合であり、補償電圧は白抜きの矢印で表したベクトルの和となる。また、補償電力は (1) 式の通りであり、a 相に大きな補償電力が必要である。

一方、右図は (9) 式の V_o を用いた場合を表している。左図に示した $(V_n - V_s)$ に V_o を加えたものが補償電圧となり、負荷には点線で示した正三角形のような、線間電圧が正常に維持された電圧が供給される。

1 相地絡、2 相地絡および 2 相短絡に対して、 V_o を用いて瞬低補償を行った場合の、補償電力 P_i を (10) 式、(11) 式、(12) 式に示す。いずれも、3 相均等に補償電力が出力されている。

$$[1LG] \begin{cases} P_{i_a} = \left(\frac{2\alpha}{3} e^{j0} - \frac{\alpha}{3} e^{j2\phi} \right) \cdot e^{j\phi} = \frac{\alpha}{3} \cos \phi \\ P_{i_b} = \left(\frac{\alpha}{3} e^{j\pi} - \frac{\alpha}{3} e^{j2\phi} \right) \cdot e^{j(\phi - \frac{2\pi}{3})} = \frac{\alpha}{3} \cos \phi \\ P_{i_c} = \left(\frac{\alpha}{3} e^{j\pi} - \frac{\alpha}{3} e^{j2\phi} \right) \cdot e^{j(\phi + \frac{2\pi}{3})} = \frac{\alpha}{3} \cos \phi \end{cases} \quad (10)$$

$$[2LG] \begin{cases} P_{i_a} = \left(\frac{\alpha}{3} e^{j0} + \frac{\alpha}{3} e^{j2\phi} \right) \cdot e^{j\phi} = \frac{2\alpha}{3} \cos \phi \\ P_{i_b} = \left(\frac{\sqrt{3}\alpha}{2} e^{-j\frac{\pi}{2}} + \frac{\alpha}{6} e^{j\pi} + \frac{\alpha}{3} e^{j2\phi} \right) \cdot e^{j(\phi - \frac{2\pi}{3})} \\ = \frac{2\alpha}{3} \cos \phi \\ P_{i_c} = \left(\frac{\sqrt{3}\alpha}{2} e^{j\frac{\pi}{2}} + \frac{\alpha}{6} e^{j\pi} + \frac{\alpha}{3} e^{j2\phi} \right) \cdot e^{j(\phi + \frac{2\pi}{3})} \\ = \frac{2\alpha}{3} \cos \phi \end{cases} \quad (11)$$

$$[2LS] \begin{cases} P_{i_a} = \frac{\alpha}{2} e^{j2\phi} \cdot e^{j\phi} = \frac{\alpha}{2} \cos \phi \\ P_{i_b} = \left(\frac{\sqrt{3}\alpha}{2} e^{-j\frac{\pi}{2}} + \frac{\alpha}{2} e^{j2\phi} \right) \cdot e^{j(\phi - \frac{2\pi}{3})} \\ = \frac{\alpha}{2} \cos \phi \\ P_{i_c} = \left(\frac{\sqrt{3}\alpha}{2} e^{j\frac{\pi}{2}} + \frac{\alpha}{2} e^{j2\phi} \right) \cdot e^{j(\phi + \frac{2\pi}{3})} \\ = \frac{\alpha}{2} \cos \phi \end{cases} \quad (12)$$

3・2 効果の試算 ここでは、3 相均等に補償電力を出力する効果を把握するため、(9) 式の V_o を用いた場合の補償可能時間を試算する。

はじめに、 V_o と補償可能時間の関係について示す。コンデンサをエネルギー源とした直列型瞬低補償装置において、瞬低補償開始から時間 T 後のコンデンサ電圧は、コンデンサ蓄積エネルギーの変化分と補償電力の関係から (13) 式より求められる。ここで、 k は a 相、b 相、c 相のうち任意の相、 $V_{C_{kj}}(t)$ は k 相の階調制御インバータシステムの j 番目 ($j = 1, 2, 3, 4$) のインバータユニットの時刻 t におけるコンデンサ電圧、 C_{kj} はこのインバータユニットのコンデンサの静電容量を表す。

$$\sum_{j=1}^4 \frac{C_{kj}}{2} [V_{C_{kj}}(0)^2 - V_{C_{kj}}(T)^2] = [(V_n - V_s + V_o) \cdot I_k] \times T \quad (13)$$

このように、本装置のコンデンサ電圧の計算は若干複雑になるが、補償中もコンデンサの電圧比率を概ね 2 倍づつに維持できる⁽⁴⁾ ことから、(13) 式左辺のコンデンサ蓄積エネルギーを表す式を (14) 式のように近似する。

$$\sum_{j=1}^4 \frac{C_{kj}}{2} V_{C_{kj}}(t)^2 = \sum_{j=1}^4 \frac{C_{kj}}{2} (2^{j-1} \cdot V_{C_{k1}}(t))^2 \\ = \frac{1}{2} \frac{\sum_{j=1}^4 C_{kj} \cdot 2^{2j-2}}{\left(\sum_{j=1}^4 2^{j-1} \right)^2} \left(V_{C_{k1}}(t) \cdot \sum_{j=1}^4 2^{j-1} \right)^2 \quad (14)$$

ここで、任意の k 相について (15) 式の C_k を定義する。

$$C_k = \frac{\sum_{j=1}^4 C_{kj} \cdot 2^{2j-2}}{\left(\sum_{j=1}^4 2^{j-1}\right)^2} \dots\dots\dots (15)$$

さらに、任意の k 相における 1~4 番目のインバータユニットのコンデンサ電圧の和を (16) 式のように定義する。

$$V_{Ck}(t) = \sum_{j=1}^4 V_{Ckj}(t) = V_{Ck1}(t) \cdot \sum_{j=1}^4 2^{j-1} \dots\dots\dots (16)$$

(14) 式, (15) 式, (16) 式を (13) 式に代入することにより, 任意の k 相に対して, (17) 式が得られる。

$$\frac{C_k}{2} [V_{Ck}(0)^2 - V_{Ck}(T)^2] = [(\mathbf{Vn}_k - \mathbf{Vs}_k + \mathbf{Vo}) \cdot \mathbf{I}_k] \times T \dots\dots\dots (17)$$

本装置は直流電圧の異なるインバータユニットを直列接続したシステムであるが, 以上のように, 補償中もコンデンサの電圧比率を 2 倍づつの関係に維持できるという近似を用いれば, コンデンサ蓄積エネルギーの変化と系統に補償するエネルギーの関係において, (15) 式のコンデンサ容量と, (16) 式のコンデンサ電圧を有する単相用の直列型瞬低補償装置と同様に取り扱うことが可能となる。

また, 瞬低を補償するためには, 任意の k 相のコンデンサ電圧 $V_{Ck}(T)$ は補償電圧のピーク値以上の電圧を有する必要があることから, (18) 式を満たす必要がある。

$$V_{Ck}(T) \geq |\mathbf{Vn}_k - \mathbf{Vs}_k + \mathbf{Vo}| \dots\dots\dots (18)$$

(17) 式, (18) 式より, 瞬低補償を行うためには, (19) 式の条件を満たす必要がある。

$$T \leq \frac{\frac{C_k}{2} (V_{Ck}(0)^2 - |\mathbf{Vn}_k - \mathbf{Vs}_k + \mathbf{Vo}|^2)}{(\mathbf{Vn}_k - \mathbf{Vs}_k + \mathbf{Vo}) \cdot \mathbf{I}_k} \dots\dots\dots (19)$$

ここで, (19) 式右辺の分母には, (1)~(3) 式もしくは (10)~(12) 式の補償電力が対応する。また, 分子 () 内の第 2 項には図 7~図 9 に示した補償電圧が対応する。

(19) 式から, $\mathbf{Vo}$ と補償可能時間 T との関係は, (20) 式のようになる。

$$T = \min_{k=a,b,c} \frac{\frac{C_k}{2} (V_{Ck}(0)^2 - |\mathbf{Vn}_k - \mathbf{Vs}_k + \mathbf{Vo}|^2)}{(\mathbf{Vn}_k - \mathbf{Vs}_k + \mathbf{Vo}) \cdot \mathbf{I}_k} \dots\dots (20)$$

具体例を用いて補償可能時間延長効果を試算した結果を, 図 10 に示す。縦軸は, $\mathbf{Vo}$ を用いて 3 相均等に補償電力を出力した場合の補償可能時間 T_1 と, 基準電圧 $\mathbf{Vn}$ と系統電圧 $\mathbf{Vs}$ の差分のみを補償した場合の補償可能時間 T_2 の比である。横軸は, 基準電圧と負荷電流の位相角である。

なお, コンデンサ初期充電電圧 $V_{Ck}(0)$ は, 3 相短絡事故への対応も考慮して, 基準電圧ピーク値に対して若干余裕を持たせて a 相, b 相, c 相とも 1.2 [p.u.] とした。(15) 式に対応するコンデンサ容量は 3 相等しいとした。 α は瞬低の約 9 割が, 電圧低下幅 60% 以内という実績⁽¹⁾ から, 0.6 [p.u.]

図 10 補償可能時間に対する効果
Fig. 10. Effect for compensation time.

とした。基準電圧と負荷電流の位相角 ϕ は, 一般的な無停電電源システムの定格を参考に, $-\pi/4 \leq \phi \leq 0$ とした。

図 10 より, 3 相均等に補償電力を出力することにより, 先の条件による 1 相地絡に対して約 100%, 2 相地絡および 2 相短絡に対して約 20~50% 補償可能時間を延長できることがわかる。

3.3 具体的制御アルゴリズム 3 相均等な補償電力出力は, いくつかのアルゴリズムで実現可能と考えるが, ここではコンデンサ電圧を常時監視し, 3 相のコンデンサ電圧を等しく保つように $\mathbf{Vo}$ を逐次補正する, 次のような方法を採用した。

$\mathbf{Vo}$ の補正量を求めるにあたり, (17) 式において, a 相, b 相, c 相のうち任意の k 相の補償電圧を微小量 $\Delta V_{Ok}(t) \cdot \mathbf{Vn}_k$ 変化させたときの, 当該相のコンデンサ電圧の変化 $V_{Ck}(t)$ との関係を, (21) 式のように近似する。

$$-C_k \cdot V_{Ck}(t) \cdot \Delta V_{Ck}(t) = \Delta V_{Ok}(t) \cdot (\mathbf{Vn}_k \cdot \mathbf{In}_k) \cdot T_e \dots\dots\dots (21)$$

$\Delta V_{Ck}(t)$ を k 相のコンデンサ電圧が 3 相平均値から乖離した量 (以下, コンデンサ電圧の誤差と略す) とすると, $\Delta V_{Ok}(t)$ は (22) 式のように整理できる。

$$\Delta V_{Ok}(t) = \frac{C_k}{(\mathbf{Vn}_k \cdot \mathbf{In}_k) \cdot T_e} \cdot V_{Ck}(t) \cdot \left(V_{Ck}(t) - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} V_{Cj}(t) \right) \dots\dots\dots (22)$$

(22) 式の $\Delta V_{Ok}(t)$ は, 負荷の有効電力が $(\mathbf{Vn}_k \cdot \mathbf{In}_k)$, 本装置のコンデンサ容量が C_k で定められるシステムにおいて, 概ね時間 T_e でコンデンサ電圧の誤差を是正するための $\mathbf{Vo}$ 補正量の k 相成分を意味する。

系統周波数の 1 サイクル内のコンデンサ電圧の誤差の変動を平滑化するため, $\Delta V_{Ok}(t)$ を時定数 T_f のローパスフィルタを通して演算したとして, サンプル値制御系における $V_{Ok}(t)$ を (23) 式のように表す。

$$V_{Ok}(t_n) = \int_0^{t_n} \frac{e^{-\frac{t_n-\tau}{T_f}}}{T_f} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} [\Delta V_{Ok}(\tau) \cdot \delta(\tau - t_m) \cdot (t_m - t_{m-1})] d\tau \dots\dots\dots (23)$$

(23) 式より, 時刻 t_n における V_o は, (24) 式のように整理できる。

$$V_o(t_n) = V_o(t_{n-1}) \cdot e^{-\frac{t_n - t_{n-1}}{Tf}} + \frac{t_n - t_{n-1}}{Tf} \cdot \sum_{k=a,b,c} \Delta V_{ok}(t_n) \cdot V_{n_j} \dots \dots \dots (24)$$

以上に基づき得られた V_o の補正方法を, DSP 上のプログラムで実現した。なお定数 Te および Tf の設定の考え方は次の通りである。

定数 Te はコンデンサ電圧の誤差を是正するために要する時間を決定する。小さく設定すれば, コンデンサ電圧の誤差の是正にあたって V_o 補正の追従が良くなるが, 負荷の有効電力 ($V_{n_k} \cdot I_{n_k}$) およびコンデンサ容量 C_k によっては, $|V_o|$ が不要に大きくなり, (18) 式が成立しなくなる。一方で, Te を必要以上に大きく設定すれば, V_o 補正の追従が遅れ, 誤差を十分に是正できなくなる。

定数 Te の決定にあたっては, これらのトレードオフを考慮する必要があるが, 通常瞬低補償装置の補償可能時間は, 系統周波数の数十サイクルもしくはそれ以上に設定されるため定数 Te は系統周波数の数サイクル程度に設定すれば, コンデンサ電圧 $V_{Ck}(t)$ の変化に対して十分に短い時間であるため, 十分な追従性でコンデンサ電圧の誤差を是正できる。

また, 定数 Tf は 1 サイクル内でのコンデンサ電圧の誤差の変動を平滑化することを目的とする。これについても, 大きく設定しすぎると, 定数 Te 同様にコンデンサ電圧の誤差を十分に是正できなくなる。したがって, 1 サイクル ~ 定数 Te を超えない範囲が設定の目安である。

以上, Te および Tf の定数設定の考え方を示したが, 実際には概ね先の値を目安としつつ, デジタルシミュレーションにより, V_o の変化とコンデンサ電圧の誤差の関係を確認しながら調整した。

4. 実証試験

4.1 実験条件 3 相交流電源, 瞬低補償装置, 瞬低発生装置, および純抵抗とリアクトルの直列接続からなる負荷を用いて, 試験回路を構成した。試験回路の概要および定数は, それぞれ図 11 および表 1 の通りである。

基準となる相電圧のピーク値は 390 V であり, 3 相交流電圧に換算すると約 480 V に相当する。瞬低補償装置は 1 レベルが 28 V の近似正弦波を出力できる。

瞬低補償装置には, 瞬低検出から補償電圧の出力および電圧復帰による動作停止までの一連の動作を自動的に行う制御回路およびソフトウェアを実装している。

瞬低発生装置の構成と出力波形を図 12 に示す。通常動作時には 100% 出力タップ → IGBT スイッチ S_o → 負荷 RL の経路で電力を供給し, 瞬低発生には IGBT スイッチ S_o をオフし, IGBT スイッチ S_x をオンすることにより模擬瞬低を発生する。なお, U-N 間の切り替えタップにより 20%, 40%, 60%, 80% の瞬低を発生させる事ができる。また, V

図 11 試験回路の概要

Fig. 11. Experimental setup.

表 1 回路定数

Table 1. Cuircuit parameters.

Line voltage V_n	AC 390Vpeak (60Hz)
Voltage sag depth	20, 40, 60, 80% of Line voltage
Load power P_l	100 kVA (p.f.=0.87, $\phi = -\pi/6$)
Capacitance C_j (j=1~4)	6/2 ⁻¹ F
Initial voltage V_{Cj} (j=1~4)	DC 28 × 2 ⁻¹ V ($\sum V_{Cn}=1.08$ p.u.)
Time constant Te	80mS (5cycle @60Hz)
Time constant Tf	16.6mS (1cycle @60Hz)

図 12 瞬低発生装置と出力波形

Fig. 12. Sag generator and output voltage.

相, W 相についても同様にタップを設けることにより, 三相独立に低下レベルを選択できる。

4.2 試験結果および考察 まず, 1 相 (a 相) 80% の電圧低下を補償した場合の試験結果を示し, 考察を行う。図 13 はコンデンサ電圧を 3 相とも等しく保つよう制御した場合, 図 14 は比較のための実験として, 基準電圧と系統電圧の差分のみを補償した場合のコンデンサ電圧の時間変化である。瞬低開始時刻は 0.2 [sec], 継続時間は 0.6 [sec] である。

図 13 では, 瞬低補償が終了した時点で最大および最小のコンデンサ電圧の差は 10 V 程度であり, 最小のコンデンサ

図 13 コンデンサ電圧 (1 LG 80%, V_o 制御あり)
Fig. 13. Capacitor voltage (1 LG 80%, with V_o control).

図 14 コンデンサ電圧 (1 LG 80%, V_o なし)
Fig. 14. Capacitor voltage (1 LG 80%, without V_o).

電圧は 380 V を上回っている。一方、図 14 では、その差は 70 V 程度に広がり、最小のコンデンサ電圧も 350 V を下回っている。すなわち、コンデンサ電圧を 3 相とも等しく保つという点で、補償エネルギーバランスの制御は良好に動作している。

図 13 において、3 相のコンデンサ電圧が完全には一致していないが、これは、(22) 式および (24) 式のように、 V_o はコンデンサ電圧の誤差に比例するよう算出されるためである。

また、図 13 においてコンデンサ電圧の変化から計算したコンデンサ蓄積エネルギーの変化分は約 14 kJ であり、これは 100 kVA、力率 0.87 の負荷に対する 1 相 80% の電圧低下を 0.6 秒補償した場合のエネルギーとほぼ一致する。したがって、エネルギー消費の点からも、正常に動作していると考えられる。

なお図 13 および図 14 において、コンデンサの初期電圧に若干の誤差が見られるが、これは試験回路の精度等によるものであり、コンデンサ蓄積エネルギー流用制御の実証という点では、本質的な影響はない。

次に、瞬低補償中の負荷供給電圧を図 15 に示す。3 相の負荷電圧に多少アンバランスが見られるが、この主な要因は、階調制御によるインバータシステムの原理上、補償電

図 15 瞬低補償中の負荷電圧 (1 LG, V_o 制御あり)
Fig. 15. Load voltage (1 LG, with V_o control).

図 16 コンデンサ電圧 (2 LG 80%, V_o 制御あり)
Fig. 16. Capacitor voltage (2 LG 80%, with V_o control).

図 17 瞬低補償中の負荷電圧 (2 LG 80%, V_o 制御あり)
Fig. 17. Load voltage (2 LG 80%, with V_o control).

圧は離散的な値をとり、少なくとも $\pm 1/2$ レベル (14 V) 程度の誤差が生じるためである。

定量評価のため、3 相電圧波形のサイクル毎に FFT 解析を行ったが、負荷供給電圧の基本波 (60 Hz) 成分のピーク値は基準電圧 390 V に対して誤差が $\pm 5\%$ (19.5 V) 以内、また総合歪率についても 3% 以内であり、実用上十分な負荷供給電圧の品質で、瞬低補償を行えることを確認できた。

次に、a 相および b 相の 2 相の電圧を 80% 低下させ、そ

れを補償した場合の試験結果を示し、考察を行う。コンデンサ電圧の変化を図 16 に、また瞬低補償中の負荷供給電圧を図 17 に示す。

図 16 においては、1 相 80% の電圧低下の場合と同様にコンデンサ電圧の誤差が残っているが、その値は約 15 V と、ほぼ三相均等に補償電力を出力できている。また、コンデンサ蓄積エネルギーの変化分は約 27 kJ と 2 相 80% の電圧低下を 0.6 秒補償した場合のエネルギーとほぼ一致した。

図 17 においては、負荷供給電圧の基本波成分のピーク値は基準電圧 390 V に対して誤差が $\pm 5\%$ 以内、また総合歪率についても 3% 以内であり、1 相 80% の電圧低下の場合と同様に、良好な瞬低補償動作を確認できた。

5. ま と め

本稿では、階調制御電圧による瞬低補償装置を 3 相交流系統に適用するために開発した制御手法、およびその実証試験の結果について報告した。

本装置は、各相の補償電力が均等でない場合には、コンデンサ規模に対する瞬低補償時間の点で効率の良くない装置となる可能性があった。これに対し本稿では、3 相交流系統におけるインバータ制御の自由度を活用し、補償エネルギーのバランスを制御することを試みた。

実証試験の結果、いずれかの相のコンデンサ蓄積エネルギーを、異なる相の補償エネルギーに流用し、3 相均等に補償エネルギーを出力できることを確認できた。

(平成 15 年 11 月 17 日受付、平成 16 年 7 月 20 日再受付)

文 献

- (1) 「瞬時電圧低下対策」, 電気協同研究, Vol.46, No.3, pp.15-18, 20-25, 29 (1990)
- (2) N.H. Woodley, L. Morgan, and A. Sundram: "Experience with an Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.14, No.3, p.1181 (1999)
- (3) M. Yamada, A. Suzuki, A. Iwata, T. Kikunaga, H. Sasao, K. Koyama, M. Takahashi, N. Hatano, and K. Yamamoto: "Voltage Transient Sag Compensator with Controlled Gradational Voltage (1)", 2002 JIASC, IEE Japan, No.11 (2002) (in Japanese)
山田正樹・鈴木昭弘・岩田明彦・菊永敏之・笹尾博之・小山健一・高橋 貢・羽田野伸彦・山本和生: 「階調制御電圧による瞬低補償装置(1)」, 平 14 電気学会産業応用部門大会, No.11 (2002)
- (4) M. Yamada, A. Iwata, A. Suzuki, T. Kikunaga, N. Hatano, and K. Yamamoto: "Voltage Transient Sag Compensator with Controlled Gradational Voltage (2)", 2002 JIASC, IEE Japan, No.12 (2002) (in Japanese)

山田正樹・岩田明彦・鈴木昭弘・菊永敏之・羽田野伸彦・山本和生: 「階調制御電圧による瞬低補償装置(2)」, 平 14 電気学会産業応用部門大会, No.12 (2002)

- (5) 「半導体電力変換回路」, 電気学会半導体電力変換方式調査専門委員会, pp.129-130 (1987)

羽田野 伸 彦 (正員) 1964 年 1 月 2 日生。1987 年 3 月大阪大学工学部電子工学科卒業。1989 年 3 月同大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月関西電力(株)入社。主としてパワーエレクトロニクス機器の電力系統応用に関する研究に従事。

山 田 正 樹 (正員) 1972 年 11 月 22 日生。1995 年 3 月大阪大学工学部原子力工学科卒業。1997 年 3 月同大学院工学研究科原子力工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。研究用加速器、パワーエレクトロニクス機器の開発に従事。

岩 田 明 彦 (正員) 1961 年 1 月 14 日生。1981 年 3 月八代高専情報電子工学科卒業。同年 4 月三菱電機(株)入社。アーク溶接機、レーザ装置など各種電源機器の開発に従事。工学博士。

菊 永 敏 之 (正員) 1955 年 5 月 2 日生。1983 年 3 月東京工業大学大学院理工学研究科電気・電子工学専攻博士過程修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。先端技術総合研究所勤務。大出力マイクロ波・ミリ波電子管、パワーエレクトロニクスに関する研究開発に従事。2004 年 6 月より同社姫路製作所勤務。工学博士。プラズマ・核融合学会会員。