

簡易電圧不平衡是正化装置の基礎研究

Basic Study on a Simple Unbalanced Voltage Compensator

香田 勲^{※1}
Isao Kouda
中地 芳紀^{※1}
Yoshiki Nakachi
渡辺 長武^{※2}
Osamu Watanabe
安井 芳則^{※2}
Yoshinori Yasui

1 まえがき

近年における負荷の多様化に伴い、高品質の電力を安定に供給する必要性が一層高まりつつある。将来に向けて更なる電力品質の維持・向上を図る中で、今後起こり得る不特定多数の負荷に起因する予測困難な電圧不平衡については具体的な対策があまり考えられていなかった。

これまでに、配電線路の電圧不平衡を補償する装置としては、半導体技術を用いて無効電力を補償する方式であるSVCと自動式SVCなどが開発されてはいるが¹⁾²⁾、いずれも装置構成が複雑かつ大規模であり、設置性・経済性の面で問題がある。

本研究の目的は、配電線路の電圧不平衡を効果的に是正しようとするものであり、補償対象を電圧要素に限定することで装置構成の大幅な簡素化及びコストダウンを図った装置を開発するための基礎技術を確認することである。

今回、動作原理確認用に試作器を製作し、評価試験を実施した結果、良好なデータが得られたので、この試作器の動作原理・制御方式及び試験結果について報告する。

2 動作原理

図1に主回路構成を示す。Tr1は、W相及びU相間に一次側が直列に接続された2つの同一な調整変圧器の接続点OとV相に接続された単巻変圧器であり、W-U線間電圧の midpoint とV相間に発生する電圧を調整し出力する。また、Tr2は、前記2つの調整変圧器を介してW相及びU相間に接続された変圧器であり、W-U線間電圧を調整出力する。そして、直列変圧器は、一次側がTr2出力に、二次側がV相に直列接続されており、Tr2により調整されたW-U線間電圧をV相に合成する役割を果たす。

図2は図1に示す回路による電圧調整の様子を電圧ベクトル図で示したものである。Tr1の出力電圧を調整するとV相の座標はO点とV相を結んだ直線上（垂直方向）を変位する。また同様に、Tr2の出力電圧を調整すると、V相の座標はW-U線間電圧ベクトルと同方向あるいは逆方向（水平方向）に変位する。

※1 中部電力株式会社 電力技術研究所
※2 技術開発本部 開発部

したがって、Tr1とTr2の出力調整の組み合わせにより、V相を任意の座標に変位させることができ、この原理により電圧不平衡を是正する。

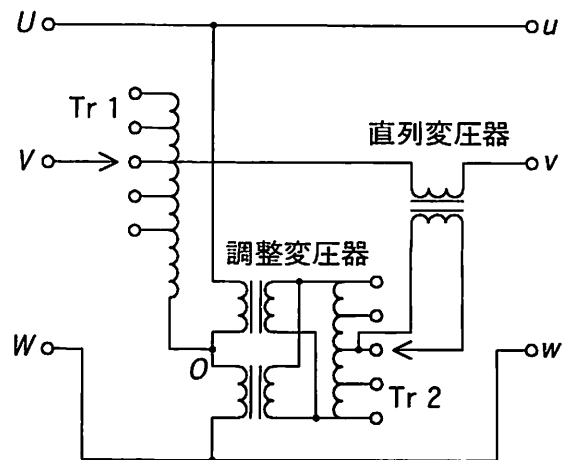


図1 / 主回路構成
Fig.1/Configuration of main circuit

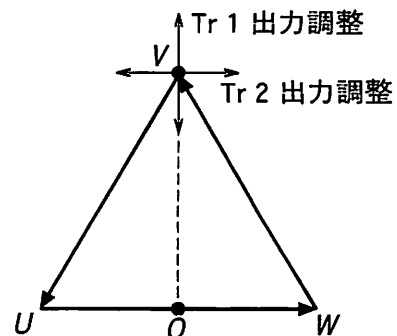


図2 / 電圧ベクトル図
Fig.2/Voltage vector diagram

3 制御方式

一般に、電圧不平衡率は次式で定義される。

$$\text{電圧不平衡率} = \frac{\text{逆相電圧}}{\text{正相電圧}} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots(1)$$

今、3相線間電圧が与えられるとき、この電圧不平衡率を

求める。図2から線間電圧を直交2軸座標系に図3に示すように置き、これらの2軸成分を

$$\dot{V}_{wu} = V_{11} + jV_{12} \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{V}_{vw} = V_{21} + jV_{22} \dots\dots\dots(3)$$

$$\dot{V}_{uv} = V_{31} + jV_{32} \dots\dots\dots(4)$$

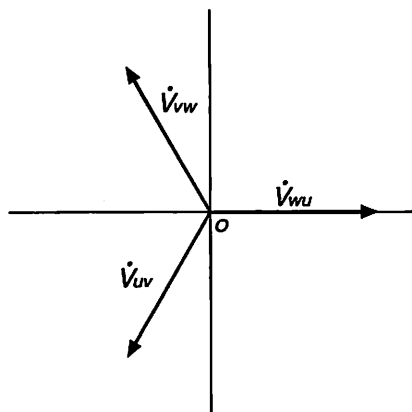


図3 / 線間電圧ベクトル図
Fig.3/Line voltage vector diagram

とおく。ここで、与えられた電圧が線間電圧であることから零相電圧が0、すなわち、

$$\dot{V}_{uv} + \dot{V}_{vw} + \dot{V}_{wu} = 0 \dots\dots\dots(5)$$

が成立する。

式(5)に式(2), (3), (4)を代入して整理すると、

$$V_{11} + V_{21} + V_{31} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

$$V_{12} + V_{22} + V_{32} = 0 \dots\dots\dots(7)$$

となり、また、 \dot{V}_{wu} を基準ベクトルとしているので $V_{12}=0$ である。したがって、式(2), (3), (4)は式(6), (7)の関係により、次式に置き代わる。

$$\dot{V}_{wu} = V_{11} \dots\dots\dots(2)'$$

$$\dot{V}_{vw} = V_{21} + jV_{22} \dots\dots\dots(3)'$$

$$\dot{V}_{uv} = -(V_{11} + V_{21}) - jV_{22} \dots\dots\dots(4)'$$

式(2)', (3)', (4)'から対称座標法により正相電圧 \dot{V}_p と逆相電

圧 \dot{V}_n を求めると、

$$\begin{aligned} \dot{V}_p &= \frac{1}{3} \{ \dot{V}_{wu} + a \dot{V}_{uv} + a^2 \dot{V}_{vw} \} \\ &= \frac{1}{2} V_{11} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{22} + j \left(-\frac{1}{2\sqrt{3}} V_{11} - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{21} \right) \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= \frac{1}{3} \{ \dot{V}_{wu} + a^2 \dot{V}_{uv} + a \dot{V}_{vw} \} \\ &= \frac{1}{2} V_{11} - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{22} + j \left(\frac{1}{2\sqrt{3}} V_{11} + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{21} \right) \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

よって、電圧不平衡率 U_f は、式(1)と式(8), (9)から次式により求めることができる。

$$\begin{aligned} U_f &= \frac{|\dot{V}_n|}{|\dot{V}_p|} \\ &= \sqrt{\frac{V_{11}^2 + (V_{21} - \sqrt{3} V_{22}) V_{11} + V_{21}^2 + V_{22}^2}{V_{11}^2 + (V_{21} + \sqrt{3} V_{22}) V_{11} + V_{21}^2 + V_{22}^2}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

逆に、式(10)から電圧不平衡率が k 以内となる \dot{V}_{vw} の条件を求めてみる。これを式で表すと、

$$\sqrt{\frac{V_{11}^2 + (V_{21} - \sqrt{3} V_{22}) V_{11} + V_{21}^2 + V_{22}^2}{V_{11}^2 + (V_{21} + \sqrt{3} V_{22}) V_{11} + V_{21}^2 + V_{22}^2}} \leq k \dots\dots\dots(11)$$

式(11)を展開すると、

$$V_{11}^2 + V_{11} V_{21} - \sqrt{3} V_{11} \frac{1+k^2}{1-k^2} V_{22} + V_{21}^2 + V_{22}^2 \leq 0 \dots\dots\dots(12)$$

式(12)に式(2)'を代入して整理すると、

$$\begin{aligned} \left(V_{21} + \frac{|\dot{V}_{wu}|}{2} \right)^2 + \left(V_{22} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1+k^2}{1-k^2} |\dot{V}_{wu}| \right)^2 \\ \leq 3 \left(\frac{k}{1-k^2} \right)^2 |\dot{V}_{wu}|^2 \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

となり、この式(13)は円方程式であることが分かる。よって、 \dot{V}_{vw} が式(13)を満たすとき、すなわち、 \dot{V}_{vw} が円領域

の内側に位置するとき、電圧不平衡率は k 以内となる。図4は電圧不平衡率が k 以内となっている \dot{V}_{vw} の状態を示したものである。

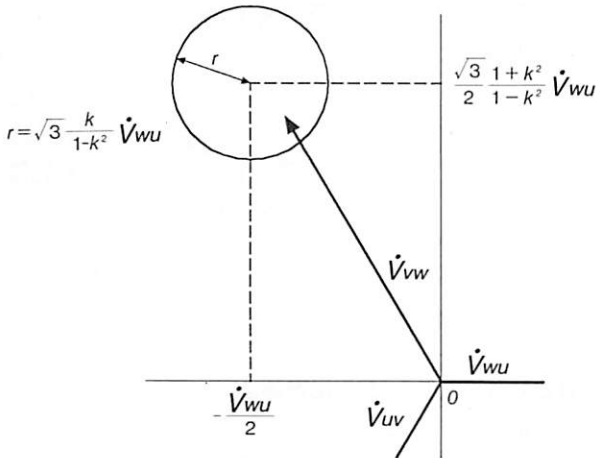


図4 / 電圧不平衡率が k となるベクトル領域
Fig.4/Voltage vector area where the ratio of unbalanced voltage is k

また、 \dot{V}_{vw} の2軸成分 V_{21}, V_{22} は、式(2)', (3)', (4)'から求められ、それぞれ次式のようになる。

$$V_{21} = \frac{|\dot{V}_{uv}|^2 - |\dot{V}_{vw}|^2 - |\dot{V}_{wu}|^2}{2|\dot{V}_{wu}|} \dots\dots\dots(14)$$

$$V_{22} = \sqrt{|\dot{V}_{vw}|^2 - \left(\frac{|\dot{V}_{uv}|^2 - |\dot{V}_{vw}|^2 - |\dot{V}_{wu}|^2}{2|\dot{V}_{wu}|} \right)^2} \dots\dots\dots(15)$$

所定の電圧不平衡率を超過しているかどうかの判定を、電圧不平衡率を求めることなく、式(13), (14), (15)に示す演算を行うことにより可能であり、演算過程において求められる是正目標となる領域円の中心点座標と \dot{V}_{vw} の座標との2軸成分の偏差の大小関係を比較することで、制御方向をも決定することが可能である。

4 試作器の概要

試作器は、4%程度の電圧不平衡率を1%以内にまで是正可能な性能を持つことを目標に製作した。表1に試作器の仕様を示す。

電圧調整を行う2つの変圧器の出力調整は、機械式接点によるタップ切換方式を採用しており、これは装置の実用

化において既にSVR(Step Voltage Regulator)で採用されているタップ選択開閉器を流用することを想定している。また、装置内部にコンピュータを内蔵しており、これに3相線間電圧を取り込んで式(1)~(15)で記述した演算式をリアルタイムで処理することにより、自動制御運転を可能にしている。なお、試作器は、模擬送電線設備における性能試験を目的としているので、模擬送電線設備の仕様準拠している。図5に試作器の外観を示す。

表1 / 試作器の仕様
Tab.1/Specification of prototype model

定格電圧	3相 275V 60Hz
定格容量	5kVA
電圧調整範囲	垂直方向：±20V (9タップ) 水平方向：±20V (9タップ)
制御方式	自動及び手動

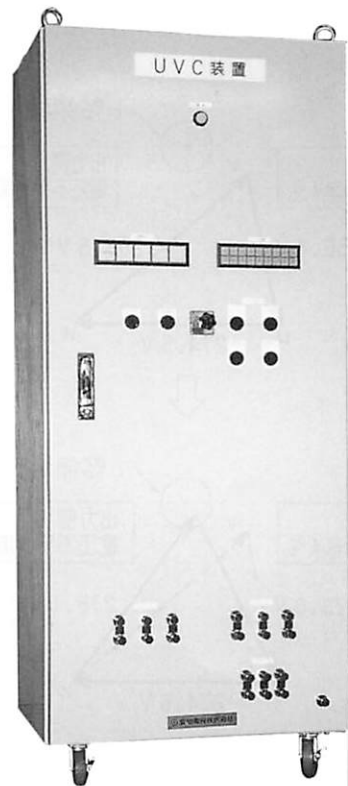


図5 / 試作器の外観
Fig.5/Prototype model

5 性能試験結果

5.1 単体試験

試作器の入力側に任意の不均衡電圧を発生できる電源を、

出力側には抵抗負荷を接続した状態で、入力電圧を変化させて、試作器の入力と出力側での電圧不平衡率を測定した。

表2に単体試験結果を示す。是正前約4%の電圧不平衡率は、V相の座標が平衡時の位置に対してどのような位置関係にあっても1%以内に是正可能であることを確認した。図6は、試作器による電圧不平衡の是正を示す一例である。

表2 / 単体試験結果
Tab.2/Results of performance test

V相座標 (平衡時位置基準)	出力側電圧不平衡率 (%)	
	是正前	是正後
上方向	4.0	1.0
下方向	4.0	0.2
左方向	4.0	0.9
右方向	4.0	0.9
左上方向	3.9	1.0
左下方向	4.0	0.4
右上方向	4.0	0.9
右下方向	4.1	0.8

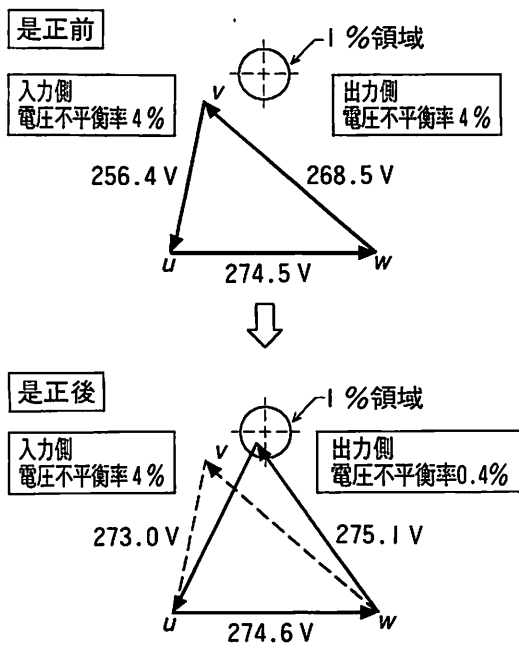


図6 / 試作器による不平衡是正効果
Fig.6/Effect of voltage balancing by prototype model

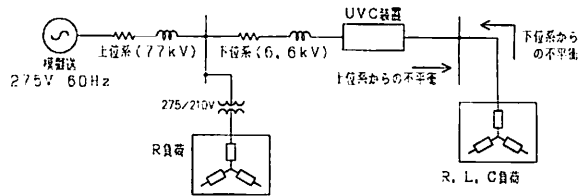
5.2 模擬送電線設備試験

本装置を6.6kV配電線路に適用した場合における、本装置による不平衡電圧の是正化効果の有無及び本装置が実系統に与える影響について把握することを目的として、6.6kV配電線路の電気的環境を模擬した模擬送電線設備に試作器を接続し、次に示す条件下において評価試験を実施した。

(1)電圧不平衡の起因箇所による影響確認

試験パターンは、

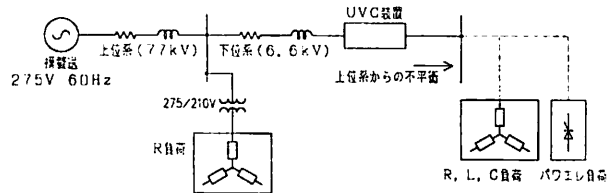
- ① 上位系に起因する電圧不平衡
 - ② 下位系に起因する電圧不平衡
 - ③ 上位・下位系の両側に起因する電圧不平衡
- であり、それぞれ線路亘長3km、6kmモデルについて実施した。



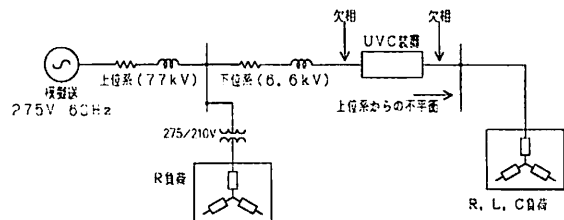
(2)負荷特性の違いによる影響確認

試験パターンは、

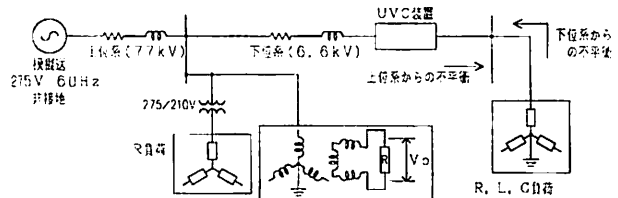
- ① 定インピーダンス負荷
 - ② 定電流負荷
 - ③ 定電力負荷
- である。



(3)系統故障時における装置の応動確認



(4)零相電圧の発生確認



模擬送電線設備における前記条件下での評価試験結果の一部を表3に示す。本装置が持つ不平衡電圧の是正能力は、電圧不平衡の起因箇所・負荷特性の違いによる影響を受けることなく、いかなる条件下においても十分是正効果を得られることが検証されたが、同時に、装置による不平衡電

圧の是正が装置入力側での電圧不平衡率を若干悪化させることが認められた。装置が系統に与える影響については、系統故障時において装置に異常な応動は認められなかったが、装置による是正化動作が低レベルの零相電圧を発生させることが認められた。

以上の実験データを評価した結果、本装置を実系統に適用した場合でも、装置が系統に与える影響は少なく、不平衡電圧の改善について十分機能するとの結論が得られた。

表3 / 模擬送電線設備試験結果
Tab.3/Experimental results

試験条件	出力側電圧不平衡率 (%)	
	是正前	是正後
下位系のみ不平衡	4.2	0.4
上位系のみ不平衡	4.7	1.1
上位系・下位系両側に起因する不平衡 (上位系1%)	4.2	1.0
上位系・下位系両側に起因する不平衡 (上位系2%)	4.5	1.0
上位系・下位系両側に起因する不平衡 (上位系3%)	4.3	0.7

6 むすび

本研究により、実系統に発生する不平衡電圧の改善を目的とした変圧器をベースとする簡易的な装置を開発するための基礎技術の確立と蓄積を図ることができた。

本研究で提案した動作原理と制御方式に基づいた実機のプロトタイプとなるミニチュアモデルを製作し、性能評価試験を実施した結果、本方式により不平衡電圧の是正が十分可能であることが確認された。また、実配電線路の線路インピーダンス・負荷特性を模擬した実験線路に試作器を接続して評価試験を行うことで、実機を実系統に設置した場合における不平衡電圧の是正効果と系統に及ぼす影響について把握することができた。

現在、本研究により得られた成果を基として実機の製作を進めており、今後、本装置の実用化に向けて更に研究を進める予定である。

参考文献

- (1) M.Z.EL-SADEK: "Balancing of Unbalanced Loads Using Static VAR Compensators", Electric Power Systems Research, 12(1987)
- (2) 藤田, 他: 「系統電圧不平衡補償を目的とした自励式 SVCの開発」, 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.232
- (3) 中地, 香田, 渡辺, 安井: 「簡易電圧不平衡是正化装置の開発に関する研究」, 平成9年電気学会電力・エ

ネルギー部門大会, No.338

筆者紹介



香田 勲

中部電力(株) 電力技術研究所

研究主査

電力系統の制御保護装置に関する研究・開発に従事



中地 芳紀

中部電力(株) 電力技術研究所

電力系統の安定化, 電力品質に関する研究・開発に従事



渡辺 長武

技術開発本部 開発部

電力機器の基礎技術の研究・開発に従事



安井 芳則

技術開発本部 開発部

電力機器の基礎技術の研究・開発に従事