

無効電力補償のための 三相不平衡電流成分の検出法に関する研究

日高良和* 吉岡雅貴** 横山正春***

A Study of a Detection Method of Three-Phase Unbalanced Currents for Static Var Compensators

Yoshikazu HITAKA* Masaki YOSHIOKA ** Masaharu YOKOYAMA***

Abstract: Reactive power failure in the power system has become a problem. To suppress these, the Static Var Compensator (SVC) are widely used. I examined the detection method of the Three-Phase Unbalanced currents necessary to carry out reactive power compensation in Three-Phase Unbalanced, and a method confirmed that it was proper by simulation.

Key words : Unbalanced currents, Static Var Compensator

1. はじめに

従来から、電力系統の電圧変動の原因のひとつとして、圧延機やアーク炉のような大電力を使用する負荷による無効電流や不平衡電流の発生がある。また、近年の電気設備の省エネルギー化設計のために電力用半導体素子が多く使用されるようになり無効電力障害が問題となっている^{1) 2)}。電力系統の電圧変動を抑制し、無効電力障害を解消するために、系統の無効電流と不平衡電流を補償する無効電力補償装置 (SVC: Static Var Compensator) の設置が進んでいる³⁾。

本論文では、三相不平衡電力系統に対して SVC を設置して無効電力補償を行とときに必要な電流成分の検出法について述べている。そして、その方法の妥当性をパワーエレクトロニクス向けに開発された代表的なシミュレーションソフトである Powersim 社の PSIM を用いて確認した。

2. 無効電力補償装置について

無効電力補償装置は、コンデンサやリアクトル、及びそれらに流れる電流を制御するスイッチングデバイスで構成されており、方式として他励式と自励式の2種類がある。図1は、他励式無効電力補償装置の代表例であり、1970年代に富士電機株式会社が製品化したリアクトル電流を位相制御

する TCR(Thyristor Controlled Reactor)方式がある。TCR は、進相コンデンサ、リアクトルおよびサイリスタで構成されており、系統の電圧 v_s に対して遅れ負荷電流 i_L に進相コンデンサ C に流入する進み電流 i_C を重畳することにより負荷電流を進みの電流とする。そして、この進み電流の無効成分を TCR に流れる電流 i_{TCR} により補償することで、無効電力を零から定格容量まで連続的に調整できる装置である。

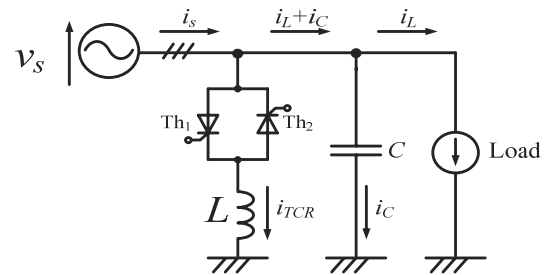


図1 TCR方式の無効電力補償装置システムの構成

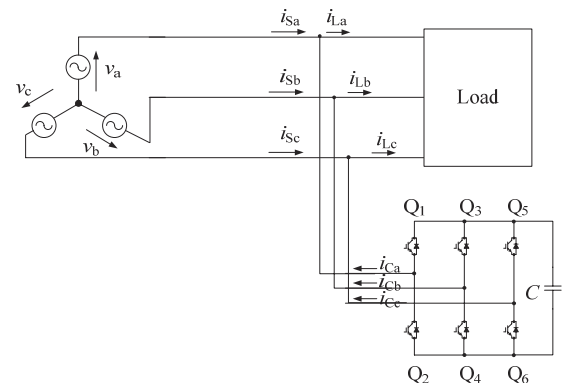


図2 自励式無効電力補償装置の構成例

(2012年12月21日受理)

*宇部工業高等専門学校 電気工学科「責任著者」

**宇部工業高等専門学校 生産システム工学専攻

***宇部工業高等専門学校 技術室

一方、自励式無効電力補償装置(STATCOM : static synchronous compensator)は、図2に示すような構成で、スイッチングデバイスである GTO(Gate Turn-Off Thyristor) や IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) などを用いた自励式変換器^[2]によって、無効電力に伴う電源電圧変動を高速かつ連続的に補償する装置である。

3. 三相不平衡電流の検出法

一般に、電力系統負荷は不平衡状態でかつ力率が1でない場合が多く、非対称三相交流として瞬時値対称座標法を用いて、対称的な三つのベクトルである零相分、正相分、逆相分に分解して取り扱わなくてはならない^{4) 5)}。そのため、不平衡負荷の場合、有効電流成分と無効電流成分をそれぞれ正相有効電流 i_{LpP} 、正相無効電流 i_{LqP} 、逆相有効電流 i_{LpN} および逆相無効電流 i_{LqN} と分解する。なお、ここでは零相分は考慮しないものとして取り扱う。

瞬時値対称座標法を用いると負荷電流 i_L は、

$$i_L = i_{LpP} + i_{LqP} + i_{LpN} + i_{LqN} \tag{1}$$

と表される。電源電流 i_s を三相平衡とするためには、正相有効電流 i_{LpP} だけとすればよいから、補償装置により(1)式の正相無効電流 i_{LqP} 、逆相有効電流 i_{LpN} および逆相無効電流 i_{LqN} を相殺すればよい。

したがって、補償電流 i_C を

$$i_C = i_{LqP} + i_{LpN} + i_{LqN} \tag{2}$$

となるようにすれば無効電力を補償することができる。

無効電力補償装置の制御では、系統から検出した負荷電流 i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} の正相分と逆相分を、それぞれ三相二相変換などを用いて正相分の有効電流と無効電流、および逆相分の有効電流と無効電流を求める必要がある。本章では、三相不平衡電流から必要な電流成分を検出する方法について述べる。

3.1 三相不平衡電流の有効成分の検出法

三相不平衡電流の有効成分である正相有効電流分と逆相有効電流分の検出法について説明する。図3は、今回対象とする電力系統であり、電源電圧は位相 θ を持ち、不平衡な三相負荷に接続されているものとする。

有効電流成分を検出するために、まず系統の不平衡な三つの線電流 i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} を(3)式の三相二相変換によって二つの

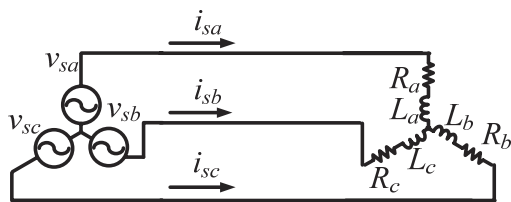


図3 対象とする電力系統

交流電流 i_α , i_β に変換する。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos 120^\circ & \cos 240^\circ \\ \sin 0^\circ & \sin 120^\circ & \sin 240^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \tag{3}$$

次に、(3)式の三相二相変換により得られた二つの交流電流を(4)式によってdq変換する。dq変換することにより、d軸分は有効成分、q軸分は無効成分と分けことができ、dq座標上に変換された交流電流の基本波成分は直流成分とみることができる。また、正相分と逆相分は電源電圧の位相 θ を使用して、正相分は位相を θ として、逆相分は位相を $-\theta$ として計算することで求めることができる。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{4}$$

ここでは、電流の有効成分を検出することが目的であるから、有効成分であるd軸成分のみを逆dq変換する。逆dq変換は(5)式で表され、d軸成分のみを逆dq変換するのでq軸成分は $i_q=0$ として計算をする。そして、dq座標上に変換された不平衡電流に含まれる高調波成分は直流成分としてみることはできないため、d軸成分はローパスフィルタを使って高調波成分を除去することとする。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{5}$$

最後に、(5)式で逆dq変換された二つの交流電流 i_α , i_β を(6)式の二相三相変換することでもとの電流 i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} の有効成分を検出することができる。

$$\begin{bmatrix} i_{apP} \\ i_{bpP} \\ i_{cpP} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \sin 0^\circ \\ \cos 120^\circ & \sin 120^\circ \\ \cos 240^\circ & \sin 240^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{6}$$

以上の有効電流成分検出の流れを図4の演算ブロック図に示す。検出した有効電流分は(2)式の補償電流 i_C で利用する。

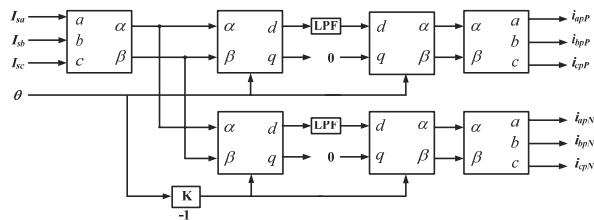


図4 有効成分検出の演算ブロック図

3.2 三相不平衡電流の無効成分の検出法

三相不平衡電流の無効成分検出は、前節で説明した有効成分の検出と手順は同様であり下記の順番で行う。なお、無効成分である q 軸成分のみを検出すればよい。

- ①系統からの三相不平衡線電流 i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} を(3)式で三相二相変換する。
- ②三相二相変換によって得られた二つの交流電流 i_α , i_β を(4)式で dq 変換する。
- ③無効成分である q 軸成分のみを検出するために、(5)式で $i_d=0$ として逆 dq 変換する。

なお、②と③の計算では、

- ・正相分は位相を θ として、
- ・逆相分は位相を $-\theta$ として

取り扱う。

- ④逆 dq 変換して得られた i_α , i_β を(6)式により三相三相変換を行うことで無効成分を得ることができる。

この無効電流成分検出の流れは、図5の演算ブロック図のようになり、これらの無効成分が(2)式の補償電流 i_c で利用される。

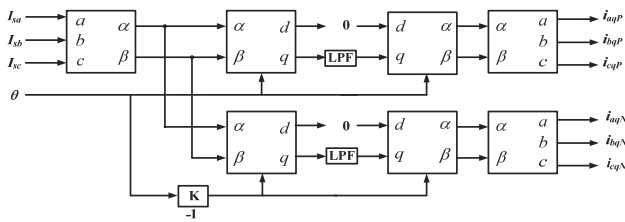


図5 無効成分検出の演算ブロック図

4. シミュレーション

4.1 シミュレーションの条件

前章で検討した三相不平衡電流の検出法によって、実際に正相分、逆相分の有効成分と無効成分が検出できるのかを確認するためシミュレーションを行った。

使用したシミュレーション用のソフトウェアは、多くのパワーエレクトロニクス関係者が利用しているPowersim社製の「PSIM」を用いた。PSIMは、パワーエレクトロニクスやモータ制御のために開発されたシミュレータであり、各種の電力変換回路がモジュールとして用意され、パワーエレクトロニクス回路の設計や解析などに利用されている。

シミュレーションで対象とした電力系統は図3の系統が不平衡な三相負荷に接続されているもので、三相電源は線間電圧 200V、周波数 60Hz としている。三相負荷は抵抗リアクトルで模擬し、それぞれの値を調整することで不平衡状態を作ることができる。PSIMに図4と図5で示した本研究で検討

した電流成分検出の演算ブロックを組み込んでシミュレーションを行った。表1にシミュレーションに用いた回路定数を示す。

表1 対象とした電力系統の回路定数

Item	Symbol	Value
Source voltage	V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	200 (V)
Source frequency	f	60 (Hz)
Load_a	L_a	7 (mH)
	R_a	4 (Ω)
Load_b	L_b	12 (mH)
	R_b	8 (Ω)
Load_c	L_c	20 (mH)
	R_c	12 (Ω)

4.2 有効成分検出のシミュレーション結果

有効成分である正相有効電流分と逆相有効電流分の検出についてシミュレーションした結果を図6に示す。図6の上から電源電圧 v_{sa} , 電源電流 i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , 正相有効電流分 i_{apP} , i_{bpP} , i_{cpP} , 逆相有効電流分 i_{apN} , i_{bpN} , i_{cpN} の波形を示してある。

図からわかるように、電源電流 i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} はそれぞれ異なった振幅となっており、不平衡の状態となっていることが確認できる。

そして、図4で示した有効電流成分の検出法によって、次の事が確認できた。

- ①正相有効電流成分 i_{apP} , i_{bpP} , i_{cpP} は、位相が $2\pi/3$ ずつずれており、 i_{apP} , i_{bpP} , i_{cpP} の振幅が等しくなっていることから対称三相交流になっている。
- ②逆相有効電流成分 i_{apN} , i_{bpN} , i_{cpN} は、位相が $2\pi/3$ ずつずれており、 i_{apN} , i_{bpN} , i_{cpN} の振幅が等しくなっていることから対称三相交流になっている。
- ③相順は、電源電流と正相有効電流成分および逆相有効電流成分の波形を比べると、正相有効電流成分 i_{apP} , i_{bpP} , i_{cpP} は電源電流と同一、逆相有効電流成分 i_{apN} , i_{bpN} , i_{cpN} は電源電流と反対となっている。
- ④正相有効電流成分と逆相有効電流分の位相は、電源電圧の位相と一致している。

これらのことから、検討した検出法で正相分、逆相分の有効成分が検出できているといえる。

4.3 無効成分検出のシミュレーション結果

ここでは、PSIMにより無効成分である正相無効電流分と逆相無効電流分を検出できているかを確認した。回路定数およびシミュレーションの対象とする系統は有効成分検出に使用したものと同一表1と図3である。シミュレーション結果は図7のようになり、上の図から電源電圧 v_{sa} , 電源電流 i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , 正相無効分 i_{aqP} , i_{bqP} , i_{cqP} , 逆相無効分 i_{aqN} ,

i_{bqN} , i_{cqN} の波形を表している. 電源電流 i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} は不平衡となっていることが確認できる.

そして, 3.2節で検討した無効成分の検出法によって,

- ①正相無効電流分 i_{aqP} , i_{bqP} , i_{cqP} は位相が $2\pi/3$ ずつずれており, i_{aqP} , i_{bqP} , i_{cqP} の振幅が等しくなっていることから対称三相交流になっている.
- ②逆相無効電流分 i_{aqN} , i_{bqN} , i_{cqN} は位相が $2\pi/3$ ずつずれており, i_{aqN} , i_{bqN} , i_{cqN} の振幅が等しくなっていることから対称三相交流になっている.
- ③相順は, 電源電流と正相無効電流分および逆相無効電流分の波形を比べると, 正相無効電流分 i_{aqP} , i_{bqP} , i_{cqP} は電源電流と同一, 逆相無効電流分 i_{aqN} , i_{bqN} , i_{cqN} は電源電流と反対となっている.
- ④正相無効電流分と逆相無効電流分の位相は, 電源電圧の位相から 90° 遅れている.

ことがわかる. このことから, 提案した検出法により正相分, 逆相分の無効成分が検出できることが確認できた.

5. まとめ

本論文では, 三相不平衡で無効電力補償を行うために必要

な三相不平衡電流の正相有効電流分と正相無効電流分, および逆相有効電流分と逆相無効電流分の検出法について検討し, それをシミュレーションで確認した. 検出は, 系統から検出した負荷電流を三相二相変換・dq変換・逆dq変換・二相三相変換の演算を行うことでできることを示した. そして, その検出法が有効であることをパワーエレクトロニクス向けに開発されたシミュレーションソフトである Powersim 社の PSIM を用いて不平衡電流から無効電力補償に必要な各電流を得られることが確認できた.

参考文献

- 1) 大久保仁:「電力システム工学」オーム社 p.1-10 (2011)
- 2) 長谷川淳, 大山力, 三谷康範, 斎藤浩海, 北裕幸:「電力システム工学」オーム社 p.37-39 (2008)
- 3) 富士電機:「無効電力補償装置特集」富士時報 第56巻第10号 (1983)
- 4) 電気学会・半導体電力変換システム調査専門委員会:「パワーエレクトロニクス回路」オーム社 p.79-83 (2010)
- 5) 小郷寛, 小亀英己, 石亀篤司:「基礎からの交流理論」コロナ社 p.248-252 (2006)

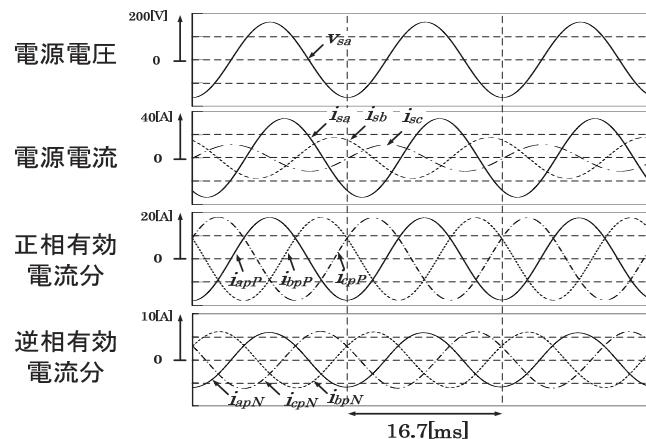


図6 有効成分検出のシミュレーション結果

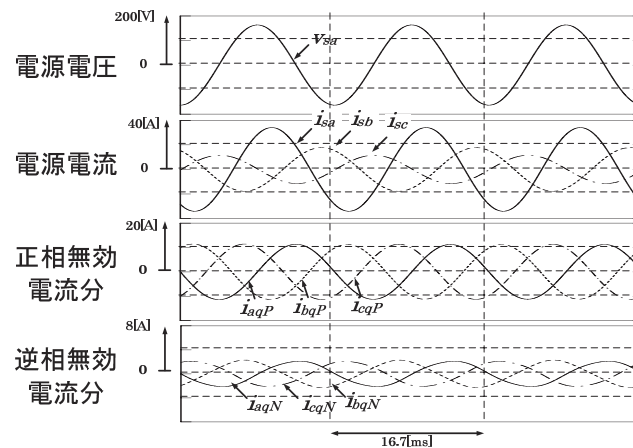


図7 無効成分検出のシミュレーション結果