

追従制御方式による三相無効電力補償装置の動作原理, 構成とADSLによるシミュレーション

The Principle of Operation, Construction, and Simulation Results of Three-phase
Reactive Power Compensation System by Follow-up Control

坪井邦夫*・原島文雄*・稲葉博*・奈良栄二*

Kunio TSUBOI, Fumio HARASHIMA, Hiroshi INABA, and Eiji NARA

1. はじめに

近年の電子装置の精密化などによって供給電力の品質の維持, 向上に対する要求が厳しくなっているが, その一方で, 発達めざましい半導体電力変換装置が多くの無効電力や高調波を発生し, その対策が重要な問題となっている. 著者らは, これらの無効電力の補償に関して, 単相交流回路への適用例については本誌でもすでに報告した^{1), 2), 3)} 実用化にあたっては三相交流回路に適用できることが望まれる. そこで, 本稿では三相用補償装置の原理と構成, およびADSLによるシミュレーション結果を報告する. 本装置は次のような機能を有している.

- i) 基本波から高次の高調波までの各種の周波数を含む無効電力を補償できる.
- ii) 負荷の急変に対して応答の速い補償を行うことができる.
- iii) 不平衡負荷(単相負荷など)を接続しても, 電源の出力は三相が平衡するように補償できる.

2. 三相補償装置の構成

三相用装置の構成は, 基本的には単相用装置の各部を三相化したもので次の三つの部分から成っている.

- i) 無効分電流 i_q の瞬時値の検出回路
- ii) 補償電流 i_c の閉ループ制御回路
- iii) 三相可制御無効電力源

しかし単に三相化しただけでは, 無効電力源からの補償電流の流れを制御している三相サイリスタブリッジインバータの構造に起因する各相補償電流間の干渉が起こる. このため各相電流をデルタ電流の形に変換する一種のマトリクス回路が加わっている. また各相間の電力の不平衡があった場合に, 平衡化補償をするような制御信号を作るための各相電力の平均値回路も加えられている. この三相補償装置の構成を図1のブロック線図に示す.

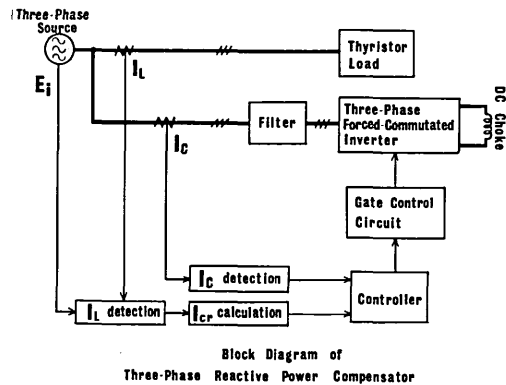


図1 三相無効電力補償装置のブロック線図

3. 動作原理

三相をそれぞれ a, b, c 相とし, 電源電圧 $e_i = (e_{ia}, e_{ib}, e_{ic})'$ を,

$$e_i = \begin{pmatrix} e_{ia} \\ e_{ib} \\ e_{ic} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \sin \omega t \\ E \sin (\omega t - \frac{2}{3} \pi) \\ E \sin (\omega t - \frac{4}{3} \pi) \end{pmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

とする. 負荷電流 $i_l = (i_{la}, i_{lb}, i_{lc})'$ は有効分 $i_p = (i_{pa}, i_{pb}, i_{pc})'$ と無効分 $i_q = (i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})'$ とに分離でき, 有効分は各相の電源電圧と同周波数, 同位相の正弦波である. すなわち,

$$i_l = i_p + i_q \dots \dots \dots (2)$$

$$i_p = \begin{pmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{pa} \sin \omega t \\ I_{pb} \sin (\omega t - \frac{2}{3} \pi) \\ I_{pc} \sin (\omega t - \frac{4}{3} \pi) \end{pmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

である. 負荷が発生する無効分電流 i_q を電源に流さないようにするためには, 本装置から $-i_q$ に相当する補償電流 $i_c = (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})'$ を負荷電流 i_l に加えてやればよい. すなわち,

$$i_c = -i_q = i_p - i_l \dots \dots \dots (4)$$

となるように補償電流 i_c は制御される.

*東京大学生産技術研究所 第3部

4. 三相電源電力の平衡化

電源電流 $i_i = (i_{ia}, i_{ib}, i_{ic})'$ は負荷電流 i_l と補償電流 i_c の和であるから、 i_c が(4)式で表わされる場合には、

$$i_i = i_l + i_c = i_p \quad \dots\dots\dots (5)$$

となり、無効電力は除去されている。しかし負荷が単相結線などの不平衡の場合には(3)式で示される i_p の各相の振幅 I_{pa}, I_{pb}, I_{pc} はそれぞれ異なった値をとり、この不平衡電力がそのまま電源からとられることになる。これを平衡化するには、補償電流を各相電力の平均値 I_p を使って次のように変更しなければならない。

$$i_c^* = i_p^* - i_l \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$$i_p^* = \begin{pmatrix} i_{pa}^* \\ i_{pb}^* \\ i_{pc}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_p \sin \omega t \\ I_p \sin (\omega t - \frac{2}{3} \pi) \\ I_p \sin (\omega t - \frac{4}{3} \pi) \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$I_p = \frac{1}{3} (I_{pa} + I_{pb} + I_{pc}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

この補償電流 i_c^* が供給されれば、電源電流 i_i は、

$$i_i = i_l + i_c^* = i_p^* \quad \dots\dots\dots (9)$$

となり、各相電源電力は平衡化され同時に無効電力も除去できる。

5. 制御回路とマトリクス回路

こうして(6)式に示されるような補償電流 i_c^* を補償装置が流すように制御目標値 $i_{cr}^* = (i_{cra}^*, i_{crb}^*, i_{crc}^*)'$ が決められる。すなわち、

$$i_{cr}^* = i_p^* - i_l$$

である。この i_{cr}^* の実際の計算回路は単相の場合と同様にフーリエ級数計算法に従って、乗算器、積分器、サンプル・ホールド回路、加算器などによって構成され、それに(8)式に相当する平均値回路が追加されている。

次に、本装置では無効分電流の流れを制御するために強制転流のサイリスタブリッジインバータを 1 kHz 程度のパルス幅変調で動作させている。このブリッジインバータ回路は補償電流を a → b 相, b → c 相, c → a 相 というデルタ電流の形で各相間に流す構成になっているので、各相の補償電流の目標値 i_{cr}^* をデルタ形の目標値 $i_{cr}^{\Delta} = (i_{crab}^{\Delta}, i_{crbc}^{\Delta}, i_{craa}^{\Delta})'$ に変換する必要がある。両者の関係は、

$$i_{cr}^* = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} i_{cr}^{\Delta} \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。また、 i_{cr}^{Δ} の各要素の総和は無効電力を蓄積している直流リアクトルの電流 i_0 になる。

$$i_{crab}^{\Delta} + i_{crbc}^{\Delta} + i_{craa}^{\Delta} = i_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

この(11)、(12)両式より、 i_{cr}^* から i_{cr}^{Δ} への変換は、

$$i_{cr}^{\Delta} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} i_{cr}^* + \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} i_0 \quad \dots\dots (13)$$

となる。この変換は 2 ~ 3 個の加算器の組合せによる一種のマトリクス回路によって実現される。この変換によって各相間の干渉が除かれ、各相とも精度の高い補償が可能となる。このうち、 i_{cr}^{Δ} がパルス幅変調され、閉ループ制御回路によって実際の補償電流 i_c^* が発生される過程は単相と同様である。この補償装置の制御回路の全体構成を図2のブロック線図で示す。

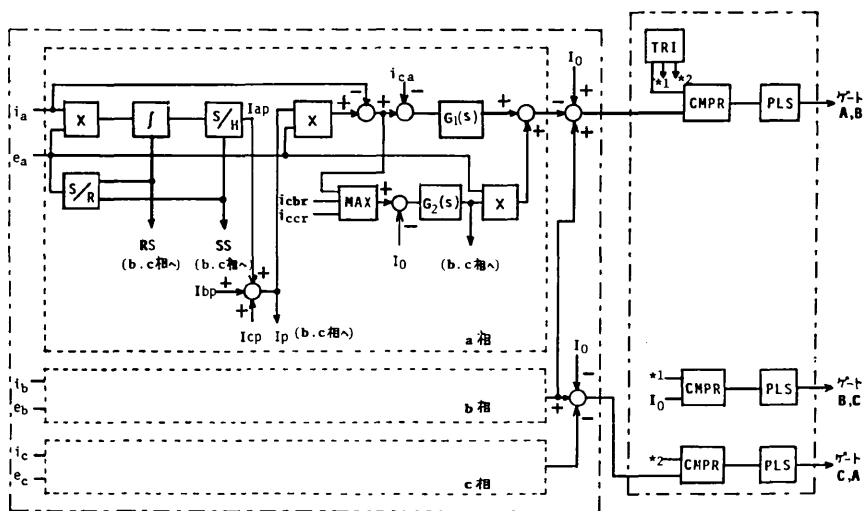


図2 制御回路のブロック線図 CONTROL CIRCUIT

6. ADSL によるミュレーション

本装置を本研究所の FACOM 230-55機のADSL (Analog to Digital Simulation Language) によってシミュレートした。この ADSL は IBM の古い CSMP と同等で、制御部の記述は容易だが、回路の記述は ECAP と比べやや面倒である。

図3は負荷電流 i_l が基本波位相遅れを持つ三角波の補償のシミュレーション結果である。上から各相の負荷電流、補償電流の目標値、補償電流、電源電流の順である。

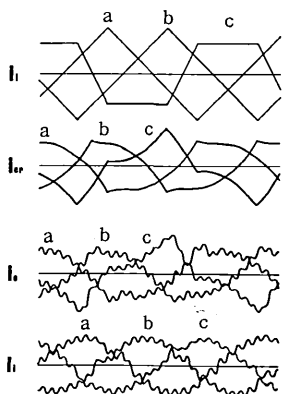


図3 基本波無効分と高調波無効分の除去のシミュレーション

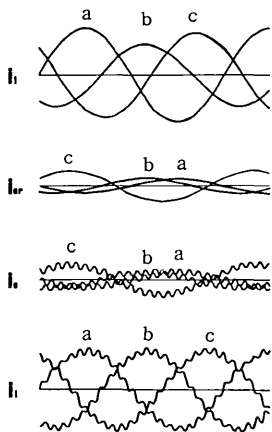


図4 三相電力平衡化のシミュレーション

電源電流は各相とも基本波位相の遅れ、高調波成分とも除去されている。高い周波数の波動はフィルタで取りきれなかったパルス幅変調の 1 kHz の変調周波数で、小さいフィルタの付加で除くことができる。図4は不平衡負荷電流に対する補償結果である。補償された電源電流の各相の振幅は等しくなっており、完全に平衡化されている。積分法はルンゲ・クッタ法、ステップ幅 $1.0 E - 05$, CPU 時間は 50 Hz 2 周期分で 2 分 30 秒程度である。

7. まとめ

本補償装置の特徴は次のとおりである。

- i) 基本波および高調波無効電力の双方を除去でき、同時に三相不平衡電力の平衡化補償ができる。
- ii) 閉ループ制御とマトリクス回路の採用により各相とも高い補償精度が得られている。
- iii) 負荷変動に対して補償の応答が早い。
- iv) 零相電流がない場合には二相のみの電流制御ループでよいので制御が容易である。
- v) 無効電力を蓄える直流リアクトルは、コンデンサを用いる場合に比べて小形である。
- vi) この補償装置は電源に並列に接続されるので、電源の電圧変動率を劣化させない。

(1976年7月13日受理)

参考文献

- 1) 原島, 稲葉, 小山: 追従制御方式によるサイリスタ負荷の力率改善, 生産研究 27, No 4, 1975
- 2) 坪井, 稲葉, 原島: サイリスタ負荷の無効電力の検出とその制御, 生産研究 27, No 10, 1975
- 3) 原島: サイリスタ負荷の力率改善, 生産研究 28, No 3, 1976
- 4) 坪井, 原島: 追従制御方式による三相無効電力補償装置とそのデジタル・シミュレーション, 昭和51年電気学会全国大会予稿集, 832/833, 1976, 4月
- 5) 坪井, 原島, 稲葉, 奈良: 追従制御方式による三相無効電力補償装置とそのデジタル・シミュレーション, 日本自動制御協会第20期通常総会学術講演会予稿集, 101/104, 1976, 5月
- 6) F. Harashima, H. Inaba, and K. Tsuboi: A Closed-loop Control System for The Reduction of Reactive Power Required by Electronic Converters, IEEE Transaction on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI - 23, No 2, May 1976