相関関数を用いた平衡化機能付き障害電流補償装置の 直流コンデンサ電圧一定制御法の検討

大村 泰* 渡辺 修治**
田中 俊彦***

A Constant DC Capacitor Voltage Control Method of the Non-Active Current Compensator
Under Non-Sinusoidal and Unbalanced Conditions Using the Correlation Function

Yasushi Omura*, Shuji Watanabe**, Toshihiko Tanaka***

This paper discusses the constant DC capacitor voltage control method of the non-active current compensator using the correlation function. The linearized model of the constant dc capacitor voltage control block is derived, and then the relationship between the capacitance of the dc capacitor and power flows into the non-active current compensator. It is shown that the capacitance can be decided considering only the power flow caused by the unbalanced situation. Digital computer simulation is implemented to verify the validity of the linearized model. The prototype experimental model is constructed and tested. Experimental results demonstrate that the linearized model is useful to design the dc capacitor and PI controller.

キーワード：相関関数，傷害電流補償，不平衡状態，アクティブフィルタ，直流キャパシタ電圧一定制御，線形化モデル

Keywords: correlation function, non-active current compensation, unbalanced condition, active power filter, constant DC capacitor voltage control, linearized model

1. まえがき

不平衡状態において，pq 理論等の三相一括した瞬時電力に着目した方法⁽¹⁾を適用すると基本波の不平衡に起因する成分が2倍の周波数で変動するため，電源側で3次の高調波を発生する問題点がある⁽²⁾。そこで著者らは先に，三相四線式システムにおいて各相電圧と電流の相関に着目した各相別障害電流補償法を提案し，その有効性を明らかにした⁽³⁾⁽⁴⁾。各相電圧と負荷電流の相関に着目した障害電流補償法を不平衡状態の三相三線式システムに適用すると零相分の扱いが問題となる。そこで，三相一括した演算による

平衡化法が提案されている^{(5)~(8)}。文献⁽⁷⁾では，積分区間を検出信号のサンプリング区間とすることで電源電圧が歪んだ場合でも正弦波有効電流を検出できることを示している。さらに，文献⁽⁸⁾では，アクティブフィルタの電流制御法と直流電圧一定制御法について検討している。三相不平衡状態において，直流コンデンサ電圧脈動は負荷変動，高調波電流および不平衡により生じるが，これらの成分を詳細に検討しアクティブフィルタの直流コンデンサ一定電圧制御法について詳細に検討した例は，著者らの知る限りあまり見当たらないように思われる。

本論文では，各相電圧と負荷電流の相関に着目した三相平衡化機能付き障害電流補償装置において，線形化モデルを用いた障害電流補償装置の直流コンデンサ電圧一定制御法について詳細に検討する。はじめに，障害電流補償装置の直流コンデンサ電圧一定制御ブロックの線形化モデルを導出する。つぎに，導出した線形化モデルを用いて直流コンデンサ電圧一定制御系について検討し，定常時および負荷変動時における直流電圧変動とコンデンサ容量との関係を明らかにする。計算機シミュレーションおよび実験結果から線形化モデルを用いた直流コンデンサ電圧一定制御ブロックの検討結果の妥当性を確認する。

* 新居浜工業高等専門学校 数理科

〒 792-8580 愛媛県新居浜市八雲町 7-1

Department of Science, Niihama National College of Technology

7-1 Yagumo-cho, Niihama, Ehime 792-8580

** 松江工業高等専門学校 電気工学科

〒 690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4

Department of Electrical Engineering, Matsue National College of Technology

14-4 Nishiikuma-cho, Matsue, Shimane 690-8518

*** 山口大学大学院 理工学研究科 情報・デザイン工学系学域

〒 755-8611 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16-1

Department of Electrical and Electronic Engineering, Yamaguchi University

2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611

図 1 システム構成図
Fig. 1. A system circuit diagram

表 1 本論文で用いた回路定数
Table 1. Circuit constants for Fig.1.

3φ, 200V, 60Hz, 10kVA Base	
Source impedance $L_s : 0.39[\text{mH}](3.7\%)$	Filter inductance $L_c : 1.65[\text{mH}](15.6\%)$
DC capacitance $C_d : 1700[\mu\text{F}]$	Smoothing inductance $L_r : 1.0[\text{mH}](9.5\%)$
Smoothing Capacitance $C_r : 1450[\mu\text{F}]$	DC load resistance $R_r : 33[\Omega]$
Load inductance $L_l : 11.6[\text{mH}]$	Load resistance $R_l : 6.6[\Omega]$

2. 相関関数を用いた三相障害電流補償法

〈2・1〉 システム構成図 図 1 に、三相障害電流補償装置の主回路構成を示す。平衡三相電源に、高調波発生源である単相ダイオード整流回路および線形負荷である単相 RL 回路が接続されている。三相電圧形インバータから構成される補償装置は、ヒステリシス比較方式 PWM により、各相毎に指令値電流に追従するように制御される。表 1 に、本論文で用いた回路定数を示す。図 1 において、三相 200V, 60Hz, 10kVA をベースとしている。電源側インピーダンスは 3.7% である。ダイオード整流回路の直流側には 9.5% の DC インダクタを接続し、並列形 APF 起動後に補償電流が整流回路に流入する問題を防止している。

〈2・2〉 相関関数を用いた平衡有効電流検出法 関数空間において、電圧 $v(t)$ と電流 $i(t)$ の内積は次式で与えられる。

$$\langle v(t), i(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t v(t) \cdot i(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式は、有効電力を表している。受電端における ab 線間および cb 線間電圧を $v_{ab}(t)$, $v_{cb}(t)$, とし、a 相と c 相の各負荷電流を $i_{La}(t)$, $i_{Lc}(t)$ とすると、三相の有効電力 P は 2 電力計法の原理より次式で表される。

$$P = \langle v_{ab}(t), i_{La}(t) \rangle + \langle v_{cb}(t), i_{Lc}(t) \rangle \dots\dots\dots (2)$$

一方、関数 $v(t)$ のノルムは次式で表され関数の実効値を意味する。

$$\|v(t)\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t v^2(t) dt} \dots\dots\dots (3)$$

従って、線間電圧 $v_{ab}(t)$ と $v_{cb}(t)$ のノルムを $\|v_{ab}(t)\|$, $\|v_{cb}(t)\|$ とする。ここで、電流が三相对称である場合を仮定し、その線電流ノルムを $\|i_L(t)\|$, その電流と電源電圧との相関係数 (力率) を r とおけば、三相の有効電力 P は次式で表される。

$$P = \sqrt{3} \cdot \|v_{ab}(t)\| \cdot \|i_L(t)\| \cdot r \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\|v_{ab}(t)\| = \|v_{cb}(t)\|$ とする。(4) 式と (2) 式の関係より、次式が得られる。

$$\|i_L(t)\| \cdot r = \frac{\langle v_{ab}(t), i_{La}(t) \rangle + \langle v_{cb}(t), i_{Lc}(t) \rangle}{\sqrt{3} \cdot \|v_{ab}(t)\|} \dots\dots (5)$$

この $\|i_L(t)\| \cdot r$ は、負荷と同じ電力でかつ三相回路が対称である場合の有効電流成分を表し、この (5) 式が本論文に

図 2 直流コンデンサ電圧一定制御ブロック図
Fig. 2. Block diagram of the constant dc capacitor voltage control.

おける新たな定義式である。これより、三相对称な各線電流の有効電流波形は (5) 式に各相の単位電圧波形を乗ずることで求められる。例えば、a 相の有効電流成分 $i_{Lap}(t)$ は次式となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$i_{Lap}(t) = \frac{v_a(t)}{\|v_a(t)\|} \|i_L(t)\| \cdot r \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $\|v_a(t)\|$ は a 相電圧 $v_a(t)$ のノルムを表す。また、線間電圧検出の場合、a 相電圧 $v_a(t)$ は次式で求められる。

$$v_a(t) = \{2v_{ab}(t) - v_{cb}(t)\} / 3 \dots \dots \dots (7)$$

以上より、負荷の障害電流成分を補償し、かつ電源電流を三相对称化するための並列形 APF の電流指令は実際の負荷電流から (6) 式の基本波有効電流を差し引くことにより求められる。a 相の障害電流成分 $i_{Laq}(t)$ は次式となる。

$$i_{Laq}(t) = i_{La}(t) - i_{Lap}(t) \dots \dots \dots (8)$$

この電流指令値は、検出した系統電圧および負荷電流からフィードフォワードで演算可能である。

3. APF の直流コンデンサ電圧一定制御法の検討

〈3・1〉 直流コンデンサ電圧一定制御ブロック

一般に、APF では直流コンデンサ一定制御ブロックが付加されている。相関関数を用いた障害電流検出法では、電源 1 周期に渡って積分を実行する必要がある。従って、負荷電流がステップ的に変動した場合には基本波有効電流の検出値に誤差を生じ、これに起因する有効電力が APF に流入して直流コンデンサ電圧 v_{dc} が変動する。直流コンデンサ電圧一定制御は、この負荷変動時に生じる有効電力フローを緩和する働きがある⁽³⁾。

図 2 に、直流コンデンサ電圧一定制御ブロック図を示す。直流コンデンサ電圧の指令値 V_{dc}^* と検出した直流電圧 v_{dc} の偏差を PI 調節器により増幅する。一方、検出した電源電圧 v_S をその電圧ノルムで除算することにより各相の規準電圧波形を発生する。この波形に PI コントローラの出力を乗ずることで、直流コンデンサ電圧を制御するための各相の有効電流 i_p を演算する。この i_p を各相毎で障害電流 i_{Lq} に加算したものが APF の指令値 i_c^* となる。アクティブフィルタに流入する有効電力によって直流コンデン

図 3 線形化モデルを用いたコンデンサ電圧一定制御ブロック図
Fig. 3. Block diagram of the constant dc capacitor voltage control with the linearized model.

図 4 電力フローに着目した直流コンデンサ電圧一定制御系のブロック図
Fig. 4. Block diagram of the constant dc capacitor voltage control based on the active power flow.

サ電圧を制御できるが、流入する有効電力とコンデンサ電圧との関係は非線形となる。そこで、本論文では線形化モデルを導出する。図 3 に、線形化モデルを用いた直流コンデンサ電圧一定制御ブロックを示す⁽³⁾。以下では、線形化モデルを用いて電力フローとコンデンサ容量について詳細に検討する。

〈3・2〉 APF の直流コンデンサ容量と電圧変動

〈3・2・1〉 負荷変動に起因する電圧変動

まず、負荷が変動した場合について検討する。負荷が急峻に変動すると、積分時間 T_S に起因する演算の遅れに伴って有効電流検出誤差が発生する。この有効電流検出誤差によって生じる有効電力を $p_d(t)$ 、そのラプラス変換を $P_d(s)$ とすると、 $P_d(s)$ は図 3 のブロック図において $P(s)$ の部分に外乱として作用する。したがって、図 3 の線形化モデルより、 $P_d(s)$ を入力とすると、図 4 のブロック図が得られる。このとき、図 4 の伝達関数 $G_d(s)$ は次式で与えられる。

$$G_d(s) = \frac{V_d(s)}{P_d(s)} = \frac{1}{C_d V_0} \cdot \frac{s}{s^2 + \alpha s + \beta} \dots \dots \dots (9)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{\sqrt{3} V K_P}{C_d V_0}, \quad \beta = \frac{\sqrt{3} V K_P}{C_d V_0 T_I} \quad \text{である。}$$

有効電流の演算においては、サンプルごとに基本波一周を区間とする移動積分を行っている。負荷がステップ的に Δp だけ変化した場合、検出誤差 $p_d(t)$ は Δp から 0 まで周期 T_S の間で直線的に減少する負のランプ関数となる。したがって、 $C_d V_0 / \Delta p$ で規格化した入力 $p_d(t)$ に対する応答を求めると、図 5 (a) となる。一方、(b) は直流電圧一

図5 負荷急変時における直流電圧変動

Fig. 5. DC voltage fluctuation caused by the rapid load change.

定制御法を用いていない場合の応答を示している。(a)の応答特性は、係数 α および β によって変化するが、補償電流指令値に歪が表れない範囲でよりよい応答が得られるように選んでいる。直流電圧一定制御を用いていない(b)の応答に比較し、負荷変動に起因する直流コンデンサ電圧変動を30%に低減している。図5(a)において、電圧の変動量の最大振幅を λ とすると、コンデンサ電圧変動率を δ としたときのコンデンサ容量は次式で与えられる。

$$C_d = \frac{\Delta p}{\delta V_0^2} \lambda [F] \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 Δp の単位は[kW]である。コンデンサ電圧の設定値が $V_0 = 385[V]$ のとき、負荷が10[kw]から5[kw]に変動した場合、コンデンサ電圧変動率を5[%]以下とするためには直流コンデンサ容量 C_d は約1700[μF]となる。

〈3・2・2〉脈動電力に起因する電圧変動 前節では、負荷急変に伴う直流コンデンサ電圧 v_{dc} の変動について検討したが、定常時においても補償電流に含まれる基本波逆相分および高調波成分による電力脈動により v_{dc} が変動する。特に、基本波逆相成分および不平衡に伴う第3調波による v_{dc} の変動は電源電圧の2倍の周波数となり、影響が支配的となる。そこで、定常時の脈動電力に起因する電圧変動について検討する。

(a) 第3調波による電力脈動 単相負荷による第3調波の電流実効値を I_3 位相角を ϕ_3 とすると、瞬時空間電流ベクトル $\vec{I}_3(t)$ は、次式で与えられる。

$$\vec{I}_3(t) = I_3 \left\{ e^{j(3\omega t - \frac{2}{3}\pi + \phi_3)} - e^{-j(3\omega t + \frac{2}{3}\pi + \phi_3)} \right\} \dots (11)$$

(11)式は、実効値が I_3 の正相分と逆相分に分解できる。電源電圧の相電圧を V とすると、第3次高調波電流に起因する瞬時電力フローは次式で与えられる。

$$p_3 = \sqrt{3}V I_3 \left\{ \cos(2\omega t - \frac{\pi}{6} + \phi_3) - \cos(4\omega t + \frac{\pi}{6} + \phi_3) \right\} \dots (12)$$

(12)式において右辺{ }内第1項の 2ω の変動成分が正相分電流によるものであり、右辺第2項の 4ω の変動成分が逆相成分によるものである。

(b) 基本波逆相分による電力脈動 単相負荷による基

本波の電流実効値を I_1 、相電圧に対する位相角を ϕ_1 とすると、瞬時空間電流ベクトル $\vec{I}_1(t)$ は

$$\vec{I}_1(t) = I_1 \left\{ e^{j(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \phi_1)} - e^{-j(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \phi_1)} \right\} \dots (13)$$

となる。(refl3dot2)式と同様に、実効値が I_1 の正相分と逆相分に分解できる。従って、基本波電流による瞬時電力は、

$$p_1 = \sqrt{3}V I_1 \left\{ \cos(-\frac{\pi}{6} + \phi_1) - \cos(2\omega t + \frac{\pi}{6} + \phi_1) \right\} \dots (14)$$

となる。(14)式において右辺{ }内第1項の一定値が正相分によるものであり、右辺第2項の 2ω の変動成分が逆相分によるものである。この変動の振幅は $\sqrt{3}V I_1$ となる。

電源側で不平衡分を補償した場合、補償装置はこの基本波の逆相分を出力する必要があるため、この電力脈動を考慮しなければならない。

(c) 逆相分補償による電圧変動 基本波逆相分と第3調波の電力脈動によるエネルギーフロー w_1, w_3 は(14)式右辺第2項および(12)式を積分することにより求めることができ、次式で与えられる。

$$w_1 = -\frac{\sqrt{3}V I_1}{2\omega} \sin\left(2\omega t + \frac{\pi}{6} + \phi_1\right) \dots\dots\dots (15)$$

$$w_3 = \frac{\sqrt{3}V I_3}{2\omega} \left\{ \sin(2\omega t - \frac{\pi}{6} + \phi_3) - \frac{1}{2} \sin(4\omega t + \frac{\pi}{6} + \phi_3) \right\} \dots (16)$$

w_1 の振幅は $\pm\sqrt{3}V I_1/(2\omega)$ であり、 w_3 の最大振幅は $\phi_3 = 0[\text{rad}]$ および $\phi_3 = \pi[\text{rad}]$ の時に、それぞれ $+1.5\{\sqrt{3}V I_3/(2\omega)\}$ 、 $-1.5\{\sqrt{3}V I_3/(2\omega)\}$ となる。

w_1 と w_3 のエネルギー振動のそれぞれの最大値または最小値が時間的に一致した場合に直流コンデンサ電圧脈動が最大となる。このとき、 w_1 と w_3 の振幅の和を E_m とすると、

$$E_m = \pm \frac{\sqrt{3}V(I_1 + 1.5I_3)}{2\omega} [J] \dots\dots\dots (17)$$

となる。

一方、直流コンデンサ電圧 v_{dc} が一定値 V_0 から $\pm v_d$ だけ変化した場合のエネルギー変化分 ΔE_c は

$$\Delta E_c = C_d \left\{ \pm V_0 v_d + \frac{1}{2} v_d^2 \right\} [J] \dots\dots\dots (18)$$

となる。(17)式および(18)式から、コンデンサ容量 C_d は次式で与えられる。

$$C_d = \frac{\sqrt{3}V(I_1 + 1.5I_3)}{\omega V_0^2(2\delta \pm \delta^2)} [F] \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $\delta = v_d/V_0$ であり、直流コンデンサ電圧設定値 V_0 に対する変動率を表す。この変動率 δ から(19)式によりコンデンサ容量を計算できる。例えば、第3次調波の割合

図 6 電源側で不平衡分を補償した場合の障害電流補償装置の起動時のシミュレーション結果
Fig.6. Simulation waveforms for Fig. 1 when the negative sequence is compensated.

図 7 電源電流平衡化機能を有しない各相別障害電流補償法のシミュレーション結果
Fig.7. Simulation waveforms for the non-active current compensator without the balancer.

が基本波に対して 1/3 程度とすると、基本波の逆相分が直流電圧変動またはコンデンサ容量に与える影響は第 3 調波の 2 倍程度となる。

ここで、基本波容量を $3VI_1 = 10[\text{kVA}]$ 、第 3 調波の割合を 1/3 とする。コンデンサ電圧設定値 $V_0 = 385[\text{V}]$ 、電源角周波数 $\omega = 120\pi[\text{rad/s}]$ とすると、基本波逆相分および第 3 調波による電圧変動率を $\delta = 5[\%]$ 以下にするためには、直流コンデンサ容量 C_d は約 $1600[\mu\text{F}]$ となる。

以上から、有効電流の不平衡分に起因する直流電圧の変動分と負荷変動に起因する直流電圧変動分から決定したコンデンサ容量が同程度となる。したがって、電源側で三相平衡状態とするために有効電流の不平衡分の補償を行う場合には負荷変動時の (10) 式および定常時の (19) 式を考慮して直流コンデンサ容量を決定すれば良いと結論付けられる。

4. シミュレーション結果

線形化モデルを用いた障害電流補償装置の直流電圧一定制御法の検討結果の妥当性を確認するため、計算機シミュレーションを行った。シミュレーションには、PSIM を用いた。APF の直流コンデンサ電圧の指令値は $385[\text{V}]$ としている。図 6 に、APF を起動した場合のシミュレーション結果を示す。ここでは、 K_P を 0.4 とし T_I は 0.02 としている。図 6 において、上から a 相の相電圧 v_a 、a,b,c 各相の電源電流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 、各相の補償電流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 、

さらに、直流コンデンサ電圧波形 v_{dc} である。APF 起動後は、電源電流が正弦波となっており、障害電流が補償されていることが確認できる。また、各相毎に相電圧と線電流の位相が等しく基本波有効電流のみとなっており、さらに、不平衡状態であった電源電流が APF 起動後は平衡状態となっていることが確認できる。図 7 は、先に提案した各相別障害電流補償法⁽³⁾のシミュレーション波形である。この波形と比較して、三相平衡化機能を付加した場合でも APF の変換器容量は増加していない。また、図 6 と図 7 のシミュレーション結果の直流コンデンサ電圧波形 v_{dc} を比較すると、図 6 の直流コンデンサ電圧 v_{dc} の変動分が増大している。これより、有効電流の不平衡分を補償することで、逆相分に起因する v_{dc} の変動分が増大していることが確認できる。シミュレーションでは単相負荷 2 台接続のため基本波負荷容量は $7.4[\text{kVA}]$ となっている。これより、(19) 式から定常時の電力脈動によるコンデンサ電圧 v_{dc} の変動率を求めると 3.4% となる。一方、シミュレーション結果では 3.1% であり、両者はよく一致している。このことから、線形化モデルの妥当性を確認できる。

図 8 に、負荷をステップ的に変化させた場合のシミュレーション結果を示す。負荷で消費される有効電力を $6.3[\text{kW}]$ から $3.8[\text{kW}]$ に変化した。負荷が変動した場合でも、電源電流は基本波有効電流のみであり、かつ平衡三相となっている。直流コンデンサ電圧一定制御を用いることで、有効電流検出の演算時間による遅れは補償特性において実用上

図 8 障害電流補償装置の負荷変動時のシミュレーション結果

Fig.8. Simulation waveforms for the non-active current compensator with load fluctuations.

表 2 実験で用いた回路定数

Table 2. Circuit constants for the constructed experimental model.

3 ϕ , 200V, 60Hz, 10kVA Base	
Source impedance	Filter inductance
$L_S : 0.39[\text{mH}](3.7\%)$	$L_C : 1.55[\text{mH}](14.7\%)$
DC capacitance	Smoothing inductance
$C_d : 1700[\mu\text{F}]$	$L_r : 1.0[\text{mH}](9.5\%)$
Smoothing Capacitance	DC load resistance
$C_r : 1500[\mu\text{F}]$	$R_r : 90[\Omega]$
Load inductance	Load resistance
$L_1 : 11.6[\text{mH}]$	$R_1 : 13.2[\Omega]$

問題ないと考えられる。シミュレーションにおける負荷変動量は 2.5[kW] である。(10) 式から直流コンデンサ電圧変動率を求めると 2.5% となる。これに定常時の電圧変動率を考慮すると、5.9% となる。一方、図 8 のシミュレーション結果では、コンデンサ電圧のリプル率は 5.9% である。両者は極めてよく一致しており、〈3・2〉節における線形化モデルを用いた直流コンデンサ容量と電圧変動についての理論的検討の妥当性が確認できる。

5. 実験結果

線形化モデルを用いた障害電流補償装置の直流電圧一定制御法の検討結果の妥当性をを確認するため、実験装置を構成し実験による検証を行った。実験では、図 1 の回路構成を用いた。構成した実験装置の回路定数を表 2 に示す。負荷の基本波容量は 4.4[kVA] である。図 9 に、APF 起動時の実験結果を示す。上から a 相の相電圧、電源電流、補償電流、c 相の相電圧、電源電流、補償電流、および直流コンデンサ電圧波形となっている。APF 起動後は、電源側で力率 1 の正弦波で平衡三相電流となっており、提案方式の有効性が確認できる。また、APF 起動後の定常時における直流コンデンサ電圧の電圧変動率は、1.8% である。負荷

図 9 障害電流補償装置の起動時の実験結果

Fig.9. Experimental results for the non-active current compensator.

図 10 障害電流補償装置の負荷変動時の実験結果

Fig.10. Experimental results when the load conditions were rapidly changed.

容量を用いて、(19) 式から電圧変動率の理論値を求めると 2.0% となる。両者はよく一致している。図 10 に、負荷で消費される電力を 3.4[kW] から 2.2[kW] に変化した場合の実験結果を示す。負荷が変動した場合でも電源電流は正弦波でかつ平衡状態となっている。このことより、積分演算時間に起因する有効電流検出遅れは実用上問題のないことが確認できる。さらに、負荷の消費電力が 1.2[kW] 変動し

た場合の直流コンデンサ電圧の変動率の理論値は1.2%である。定常状態における変動率を考慮するとコンデンサ電圧の電圧変動率は、3.2%となる。一方、図10の実験結果では、コンデンサ電圧の電圧変動率は3.1%となった。両者は良く一致しており、図3の線形化モデルを用いたAPFの直流コンデンサ容量についての検討結果の妥当性が確認できる。

6. む す び

本論文では、相関関数を用いた三相平衡化機能付き障害電流補償装置において直流コンデンサ電圧一定制御系について詳細に検討した。はじめに、障害電流補償装置の直流コンデンサ電圧一定制御ブロックの線形化モデルを導出した。次に、障害電流補償装置のパワーフローを詳細に検討し、直流コンデンサ電圧変動とコンデンサ容量との関係を明らかにした。計算機シミュレーションおよび実験結果から、APFの直流コンデンサ電圧変動分を検討し、線形化モデルを用いた解析結果とよく一致することを確認した。これより、解析に用いた線形化モデルの妥当性を確認した。さらに、相関関数を用いた障害電流検出法では積分時間に起因する検出時間が問題となるが、APFの直流コンデンサ電圧一定制御法がこの問題を解決可能であることを明らかにした。

文 献

- (1) H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Trans. Ind. Appl. cat.*, Vol. 20, No. 3, May/June 1984.
- (2) A. Nabae, L. Y. Cao, and T. Tanaka, "A Universal Theory of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Including Zero Sequence Component," *Proceedings of IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power* (Las Vegas), pp. 90-95, October 1996.
- (3) 大村, 田中:「相関関数を用いた非正弦波不平衡状態における各相別障害電流補償法」, パワーエレクトロニクス学会誌, Vol. 31, pp. 94-100 (2005)
- (4) 西田, 田中, 船曳:「家電機器が発生する高調波電流の一抑制法」, 平成12年度電気情報関連学会中国支部連合大会, No. 160505 (2000)
- (5) L. Malesani, L. Rosseto and P. Tenti, "Active Power Filter with Hybrid Energy Storage," *Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC89)*, (Milwaukee), pp. 385-391, 1989.
- (6) L. Rosseto and P. Tenti, "Using AC-Fed PWM Converters as Instantaneous Reactive Power Compensators," *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, pp. 855-861, 1990.
- (7) L. Rosseto and P. Tenti, "Evaluation of instantaneous Power terms in multi phase systems: techniques and applications to power conditioning equipment," *European Transactions on Electrical Power Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 469-475, December 1994.
- (8) T. E. Nunez-Zuniga, and J. A. Pomilio, "Shunt Active Power Filter Synthesizing Resistive Loads," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 17, No. 2, pp. 273-278, 2002.

大 村 泰 (正員) 1986年3月長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月新居浜工業高等学校専門学校電気工学科助手, 1993年講師, 2005年数理科助教授, 現在に至る。電力系統における高調波抑制法, 太陽電池のファジーモデリングに関する研究に従事。電気学会会員。

渡 辺 修 治 (正員) 2003年3月山口大学大学院理工学研究科博士後期課程システム工学専攻修了。現在, 松江工業高等学校専門学校電気工学科講師。博士(工学)。主として強磁場発生用電源装置における回路と現代制御理論に基づいた制御システムの応用, 及び相関に着目した電力系統電力補償装置の制御に関する研究などに従事。

田 中 俊 彦 (非会員) 1984年3月長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月東洋電機製造株式会社入社。職業能力開発大学校電気工学科講師, 島根大学総合理工学部電子制御システム工学科助教授を経て, 2004年12月山口大学工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。博士(工学)。半導体電力変換器が発生する高調波とその抑制法, 環境修復システムへのパワーエレクトロニクス応用, 微生物処理を含む高度水処理などの研究に従事。平成14年中国電力技術研究財団優秀研究賞, 15年電気設備学会学術部門論文賞受賞。電気学会上級会員, 電気設備学会, IEEE 会員。

【質疑応答】

東京電力(株) 大島正明 氏

【質問1】

予稿の図9, 図10に見られる電流 i_{sc} のひげの原因は何か？

【回答1】

実験結果, 図9, 図10での電源電流波形 i_{sc} に見られる突起のような部分は, 補償電流指令の変化が急峻な部分であり, 実際の補償電流 i_{cc} が指令値に完全に追従できずに発生する誤差になります。この原因は, 補償装置の系統側に設けられたインダクタンス L_c の大きさが補償電流の最高周波数に対して大きいために発生していると考えられます。このインダクタンス L_c を少し小さくすれば改善されると思われますが, 系統側電源電圧波形に重畳するスイッチングノイズが増大するためそれを考慮しながら大きさを決定する必要があると考えております。

【質問2】

有効電力 P を求めるのに区間積分を用いている理由は？

【回答2】

本制御法では, 負荷の有効電力の演算より(5)式によって, 三相平衡の場合の有効電流実効値を検出し, (6)式によって電源電圧と相似な電流波形を生成することを基本原理としております。これらの式に用いる有効電力 P は平均値であり, これより, 電源電圧が歪んだ場合にも有効となります。従いまして, 有効電力の演算には, 基本波の一周期にわたる区間積分を用いております。

【質問3】

$\|v_{ab}(t)\| = \|v_{cb}(t)\|$ との前提で解析しているが, 現実の不平衡状態ではそうならない場合もあり得る。この場合には, どのような動作になるか？

【回答3】

ご賢察の通り, 現実の不平衡状態において線間電圧 $\|v_{ab}(t)\| = \|v_{cb}(t)\|$ の前提が成り立たない場合も十分に考えられます。その場合, 有効電流実効値の検出値が定常的に実際の値とずれることが予想されます。しかし, そのような場合におきましても, 本システムでは, 図2の直流コンデンサ電圧一定制御系により, 障害電流波形 i_{Lq} 中に含まれる有効電流誤差分を有効電流制御指令 i_p が定常的に補償するため制御結果への影響はないと考えられます。

【質問4】

実験機の平均スイッチング周波数, サンプル周波数はいくらか？

【回答4】

実験機の平均スイッチング周波数は厳密に計測しており

ませんが, 約4kHz程度です。また, 波形データのサンプル周波数は, 基本波一周期の $1/256$ としており, 約 $65\mu s$ となっております。

【質問5】

講演者の前回のご発表では, 不平衡状態の場合, 入力電流が平衡とならなかったが, 今回のご提案法では, ほぼ, 平衡となって改善されている。

【回答5】

文献⁽³⁾では, 相関関数を用いた単相アクティブフィルタの制御原理⁽⁴⁾をそのまま三相回路に適用することを考えました。そのため, 零相電流の処理が可能な中性線のある三相四線式システムに適用しております。三相三線式への適用におきましては, 同様な考え方が文献⁽⁷⁾でも報告されております。本論文では, その中でも特に直流コンデンサ電圧一定制御系について詳細に検討し, 計算機シミュレーションおよび実験結果からその事を検証したものです。

大阪大学 伊瀬敏史 氏

【質問】

直流コンデンサ電圧を一定制御すると原理的に高調波補償性能に影響すると考えられますが, この影響は, 不平衡負荷時において問題はありませんか？

【回答】ご指摘の通り, 直流コンデンサ電圧一定制御により直流電圧の脈動成分が多少なりともフィードバックされ, 原理的に高調波補償性能に影響します。特に, 不平衡負荷時においては基本波の逆相分および第3調波により, 直流電圧に基本波周波数の2倍で脈動する成分が発生し, それによって補償後の電源電流波形が歪みやすくなります。この件に関しましては, 直流電圧の検出に帯域除去フィルターを用いることで補償特性を改善しながらかつ直流コンデンサ電圧一定制御の応答を速くする手法を提案し, 文献⁽³⁾において詳細に報告しております。