直交磁心の無効電力補償装置への適用

Application of an Orthogonal Core to a VAR Compensator

前田 満・脇屋吉衛・一ノ倉 理*・村上孝一**

東北電力(株)応用技術研究所, 仙台市青葉区中山 7-2-1 (〒981)

*東北大学工学部, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980)

**八戸工業大学, 八戸市大字妙字大開 88-1 (〒031)

M. Maeda, Y. Wakiya, O. Ichinokura,* and K. Murakami**

Applied Tech. R & D Center, Tohoku Electric Power Co., Inc., 7-2-1, Nakayama, Aoba-ku, Sendai 981

*Faculty of Engng., Tohoku Univ., Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980

**Hachinohe Inst. of Tech., 88-1, Obiraki, Myo, Hachinohe 031

This paper describes the use of an orthogonal core to in a VAR compensator to stabilize line voltage in an electrical power system. An orthogonal core is a kind of variable inductor that uses the nonlinear $B-H$ characteristics of an iron core. The inductance of the secondary winding decreases with the dc control current of the primary winding. Utilizing this feature, we developed a three-phase VAR compensator with a capacity of ± 5 kVA, constructed from three-phase connected orthogonal cores and capacitor banks. Here, we discuss the fundamental operation of the VAR compensator, and demonstrate the static and dynamic operations of the trial VAR compensator. Experimental results show that the VAR compensator is useful for line voltage stabilization. A possible for first response of the compensator is also described.

Key words: orthogonal core, nonlinear magnetic device, variable inductor, VAR compensator, power converter

1. ま え が き

一般に, 需要家の電気機器は定格電圧で使用する場合に最も良い性能を発揮するように設計されており, 電圧が定格から著しくはずれると, 効率, 寿命などに悪影響が現れる. 需要家の受電端電圧を常に規定値に維持することは, 周波数の規定維持とともに, 良質な電力を供給する上で系統制御上重要な問題である.

近年の電力系統において, 負荷の増大と多様化が交流系統の電圧変動を拡大させる傾向にあり, その対策として, 系統の無効電力を高速に制御する, 静止形無効電力補償装置の導入が急速に進んでいる^{1)~3)}.

無効電力補償装置は, 電力系統の負荷の変化に応じた電圧変動を無効電力の制御により安定化させるものであり, 可変インダクタンスと固定のコンデンサを組み合わせた回路などにより構成される⁴⁾. 可変インダクタンスとしては, リアクトルにサイリスタを直列に接続して点弧角制御を行う手法などが提案されているが, 電流波形歪みを生じることからフィルタ装置を必要とするなど問題点も多い. これに対し, 可変インダクタンス素子の一つである直交磁心^{5)~8)}を無効電力補償装置へ適用する試

みがなされている.

すなわち, 直交磁心形可変インダクタンスは, 一次巻線に直流電流を流せば, 二次巻線のインダクタンスが連続的に制御されるため, 系統の遅れ無効電力の調整が可能となる. また, プッシュプル方式とすれば, 原理的に電流波形歪みが低減されるため, フィルタ装置を必要とせず, 構成の簡単な無効電力補償装置への適用が期待される^{9)~11)}.

直交磁心形可変インダクタンスの基本的な動作特性についてはすでに報告がなされているが, 制御回路も含め, 実際の無効電力補償装置に適用した例は無い. 本論文は, 電力系統の電圧安定化に供する無効電力補償装置の開発を目的に, 3 相, 200 V, ± 5 kVar 程度の装置を試作し, その動作特性について種々検討を行ったところ良好な成果が得られたので報告するものである.

2. 直交磁心形可変インダクタンス

Fig. 1(a) に直交磁心の形状を示し, 同図 (b) に可変インダクタンスとして使用する場合の基本構成を示す. 二次巻線 N_2 は交流電源に接続され, 一次巻線 N_1 には直流電圧が印加される. 制御電流 i_c を増加させれば磁心は飽和し, 磁気抵抗が増大するため二次巻線の実効的なインダクタンスが減少し, 二次電流 i_s が増加する.

一般に系統電圧は, リアクタンス X [pu] の送電線の末端に Q [pu] の分路リアクトルを投入すれば, 電圧は $\Delta V \approx XQ$ だけ低下する. 逆に Q [pu] の電力用コンデンサを投入すればその電圧上昇 ΔV [pu] は $\Delta V \approx XQ$ となる¹²⁾. このように分路リアクトル (ShR), 電力用コンデンサ (SC), などの調相設備で電力系統に供給する無効電力により系統電圧を調整することができる.

いま, 可変インダクタンスによる電圧調整について考察してみる. Fig. 2(a) に示す交流回路において, 簡単のため無負荷とすれば, 負荷端子電圧 E を下げるときは, 同図 (b) のように, 分路リアクトル (ShR) より 90 度遅れ電流 I を流すと $E = V - XI$ に低下する. また, 負荷端子電圧 E を上げるときは, 同図 (c) のように, 電力用コンデンサ (SC) によって 90 度進み電流 I

Fig. 1 Schematic diagram of an orthogonal core type variable inductor.
(a) Core structure. (b) Basic configuration.

Fig. 2 Illustration of the principle of line voltage stabilization with VAR compensation.
(a) Basic circuit. (b) With the line voltage decreased.
(c) With the line voltage increased.

を流すと $E = V + XI$ に上昇する。したがって、直交磁心のような可変インダクタンスによって無効電力を制御すれば、電圧を連続的に調整できる。以下、この特性を利用した無効電力補償装置について述べる。

3. 直交磁心を用いた無効電力補償装置

3.1 無効電力補償装置の構成

無効電力補償装置は、 $\pm 4V$ の電圧変動を検出して、その電圧変動を妨げる無効電力を電力系統に供給して系統電圧の安定化を図る装置である。直交磁心を用いた無効電力補償装置の試作器は、回路電圧を低圧の 3 相 200 V、容量は 0~ ± 5 kVar とした。その試作仕様を、Table 1 に示す。この仕様に基づいて作製した直交磁心の諸元を Table 2 に示す。Fig. 3 にこれらの磁心を用いた無効電力補償装置の回路構成を示す。

本回路においては、電圧安定化の基礎特性の検証のため、方式は単相の直交磁心 3 台を 3 相結線したものを使用した。直交磁心の二次巻線は Y 結線とし、コンデンサを並列接続し、主巻

Table 1 Specification of the trial VAR compensator

Type	Self-cooled indoor type
Capacity	-5 kVA (lead) ~5 kVA (lag)
Rated voltage	ac 210 V
Rated current	ac 15 A
Phase	3-phase
Frequency	50 Hz

Table 2 Dimensions of the core and number of turns in the windings

Core				
Material: Si-Fe (18 ZDMH)				
Dimensions (mm)				Weight (kg)
a	b	c	d	
40	40	70	120	17.48
Windings				
	N ₁	N ₂		
Sectional area (mm ²)	10	16		
Number of turns	172	106		
Resistance (Ω)	0.12	0.044		
Weight (kg)	5.8	5.9		

線として交流系統側に接続される。一次巻線は、オープン△結線として直流の制御電流を流して、主巻線のインダクタンスを制御し、進み無効電力から遅れ無効電力まで連続制御する。無効電力制御は、並列コンデンサの進相容量 5 kVar と制御電流による主巻線インダクタンスの変化で遅れ無効電力を 0~10 kVar 制御し、 ± 5 kVar を連続的に補償できるものとした。

3.2 無効電力補償装置の特性

Fig. 4 は無効電力補償装置の並列コンデンサ部分を切離した直交磁心の無効電力制御特性を示す。直交磁心の制御巻線電流に対する直交磁心の主巻線の無効電力はほぼ直線的に制御されていることが了解される。電流には、第 5 調波を主成分とした 20% 程度の歪が認められた。

無効電力補償装置の制御モードの一つである定電圧制御特性の試験回路を Fig. 5 に示す。定電圧制御試験は、試験回路の電源電圧を一定に保持し、L・C 負荷装置で、進み・遅れの無効電力 (Q_L) を、線路インピーダンスを模擬した直列リアクトル (X) に流し、 $\pm 4V \approx XQ_L$ の電圧の変化を無効電力補償装置が検出して、L・C 負荷装置の無効電力を補償する定電圧制御特性を検証した。

Fig. 6 に試験回路による定電圧制御特性の測定結果を示す。電源電圧を 3 相 200 V 一定として、L・C 負荷無効電力 Q_L を変化させると、無効電力補償装置が動作していない場合には L・C

Fig. 3 Circuit configuration of a VAR compensator using the variable inductor.

Fig. 4 Control characteristics of the VAR compensator.

負荷装置の無効電力 Q_L によって ΔV は $\pm 5V$ 程度変動するが、無効電力補償装置を動作させると無効電力 Q が補償され、L・C 負荷端子電圧は設定した電圧値に保持されることを確認した。

Fig. 7 に L・C 負荷 $\pm 2.5 \text{ kVar}$ で電圧を急変させた場合の無効電力補償装置の応答特性の測定例を示す。同図 (a) では、L・C 負荷を進相 2.5 kVar として SW を開放すると、下向きの矢印で示した動作開始時点で $\Delta V \approx XQ_L$ の電圧が上昇し、無効電力補償装置がこれを検出して遅相の無効電力を供給し、L・C 負荷の進相無効電力を打ち消して上昇分の電圧を降下させ、設定電圧を保持する。また、同図 (b) では、L・C 負荷が遅相 2.5 kVar で SW を開放すると、動作開始時点で $\Delta V \approx XQ_L$ の電圧が低下し、無効電力補償装置がこれを検出して進相の無効電力を供給し、L・C 負荷の遅相無効電力を打ち消し、低下した電圧を上昇させて設定電圧を保持していることが了解される。

Fig. 8 に無効電力補償装置試作器の外観を示す。装置の寸法は縦幅 500 mm 、横幅 500 mm 、高さ $1,000 \text{ mm}$ で下段に直交磁心 3 組を設置し、上段には制御回路を収納した。

3.3 応答特性の改善に関する考察

Fig. 7 を見ると、 ΔV の検出から設定電圧保持までの制御時間は約 4 秒程度かかっている。これは、試作器においては制御の安定性を重視したため、制御回路の応答特性は必ずしも高速ではなく、 ΔV の検出と積分回路などの時間遅れの影響と考えられる。

Fig. 5 Test circuit for stabilizing the line voltage.

Fig. 6 Relationships between the reactive powers of the compensator and the load for constant voltage control.

Fig. 9 に直交磁心制御巻線の制御電圧と応答時間特性を示す。直交磁心 1 相分の制御巻線の電圧と直流電源の設定電流値に達する時間を測定した制御電圧・応答時間特性は、制御巻線に流れる電流が設定値に達する時間が、設定電流の大小には大差はなく、制御電圧を高めると減少し、 35 V の制御電圧で約 20 ms 程度で応答することを検証した。

直交磁心の主巻線に $AC 200 \text{ V}$ を印加した状態で制御電圧を

Fig. 7 Response of the VAR compensator to a sudden change in the line voltage.

Fig. 8 General view of the trial VAR compensator.

Fig. 9 Relationship between the response time and control voltage in the orthogonal core type variable inductor.

Fig. 10 Examples of waveform.

35 V, 制御電流を 20 A に設定した観測波形を Fig. 10 に示す。ここで、原理的な特性を検証するため、実験は単相で行った。SW を投入して約 20 ms で主巻線の電流を最大電流まで立ち上げることが可能であることが了解できる。したがって、制御

時間の遅れは直交磁心の固有の特性に起因するものでなく制御回路の改良によって改善されるものと考えられる。

4. あとがき

以上、直交磁心を用いた無効電力補償装置を試作し、その特性について種々検討を行った結果について述べた。直交磁心を用いた無効電力補償装置は、簡単な構成で進み無効電力から遅れ無効電力までの連続制御可能であることが明らかになった。また、回路構成および制御回路の課題などのほか、無効電力補償装置に直交磁心を適用する場合の基本事項を掌握することができた。今後、実用器の開発を目的に、高速制御、電力品質、運転損失低減など無効電力補償装置としての性能向上化を図る予定である。

文 献

- 1) Laszlo Gyugyi: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-5, 521 (1979).
- 2) 井上昌彦: 電気学会論文誌, 108-D, 1074 (1988).
- 3) 道上 勉, 尾崎愛太郎: 電気評論, 12, 45 (1991).
- 4) 山口 顕, 上村勝彦: 電気学会雑誌, 106, 637 (1986).
- 5) S. D. Wanlass: *IEEE Wescon Tech. Papers*, 12 (1968).
- 6) Z. H. Meiksin: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA-10, 41 (1974).
- 7) 一ノ倉 理, 村上孝一: 電気学会磁気応用研究会資料, AM-76-4 (1976).
- 8) 鈴木宏和, 土屋 朗, 羽根吉寿正, 田所睦雄: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-84-92 (1984).
- 9) 一ノ倉 理, 田島克文, 斎藤寛礼, 秦泉寺敏正: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-92-259 (1992).
- 10) O. Ichinokura, K. Tajima, and T. Jinzenji: *IEEE Trans. Magn.*, 29, 3225 (1993).
- 11) 一ノ倉 理, 田島克文, 鏡 俊朗, 秦泉寺敏正: 日本応用磁気学会誌, 18, 788 (1994).
- 12) 新田日倅造: 電力系統技術計算の基礎, p. 212 (電気書院, 東京, 1980).

1994 年 10 月 12 日受理, 1995 年 1 月 20 日採録