直交磁心形 dc-ac 変換器の三相化に関する検討

Orthogonal-Core Type Three-Phase dc-ac Converter

一ノ倉 理・斎藤寛礼・田島克文*・秦泉寺敏正

東北大学工学部, 仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980)

*秋田大学鉱山学部, 秋田市手形学園町 1-1 (〒010)

O. Ichinokura, H. Saito, K. Tajima* and T. Jinzenji

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

*Mining College, Akita Univ., 1-1, Tegata-Gakuencho, Akita 010

In a previous paper, the authors proposed the orthogonal-core type dc-ac converter for photovoltaic power system. The dc-ac converter has desirable features including simple construction, high security and easiness of maintenance. The operating characteristics of the single-phase converter for residential photovoltaic power system have been reported. In this paper, we discuss the fundamental operations of the orthogonal-core type dc-ac converter for three-phase power system based on simulations and experiments. Desirable construction of the orthogonal-core type three-phase dc-ac converter has been clarified.

Key words: orthogonal-core, dc-ac converter, three-phase, photovoltaic system

1. ま え が き

連系方式の太陽光発電システムは、商用電源をバックアップとすることにより、太陽電池による不規則な発生電力の有効利用をはかるもので、オイルショックを契機として、自然エネルギーの利用技術の一方式として開発研究が進められてきた^{1)~8)}。近年は地球温暖化防止の理由から、太陽光発電システムへの要請が高まっており、今後、民生あるいは産業用として太陽光発電システムの導入は進むものと考えられる。

筆者らの考案による直交磁心形 dc-ac 変換器は、太陽電池などの不規則なローカルエネルギー源と既存の交流システムを簡単かつ安全に結ぶことが可能であるため、連系方式の太陽光発電システム用 dc-ac 変換器としての用途が期待される^{9)~14)}。

これまで筆者らは、主として家庭用規模の太陽光発電システムに適用することを前提とし、単相用の直交磁心形 dc-ac 変換器について検討を行ってきた。ここでは、直交磁心形 dc-ac 変換器の適用範囲の拡大を目的として、本変換器の三相化について基礎的検討を行った。す

なわち、直交磁心の三相結線時の特性について、シミュレーションならびに実験の両面から種々検討を行った。その結果、三相結線法の違いによる変換器特性の差異など、三相化を進める際に必要な基礎的事項が明らかになった。

本論文はこれらの成果について述べるものである。

2. 磁心形状ならびに回路構成

直交磁心としてはこれまで、Fig. 1(a) に示す 2 重直交磁心と同図 (b) に示す U 形直交磁心が提案されている。図中の N_1 , N_2 は一次および二次巻線、 i_1 , i_2 は一次および二次電流、 ϕ_1 , ϕ_2 は一次および二次磁束を示している。

Fig. 2 に三相用の直交磁心形 dc-ac 変換器の回路構成を示す。プッシュプル接続された 3 組の直交磁心の一次側は三相結線され、三相方形波インバータによって励磁されている。二次側も同様に三相結線され、既存の三相交流系統に接続されている。

Fig. 2 は一次側が Y 結線、二次側が Δ 結線の例であるが、結線法の組み合わせとしては、このほかに Δ - Δ 、 Δ -Y、Y-Y が考えられる。以下、これらの結線法の違いによる特性の差異についてシミュレーションならびに実験を行った結果について述べる。

Fig. 1 Schematic diagram of the orthogonal-core. (a) Two orthogonal-flux type. (b) Two C-core type.

Fig. 2 Basic circuit of the orthogonal-core type three-phase dc-ac converter.

3. シミュレーション

3.1 計算方法

ここではシミュレーションに基づき、三相結線方式による特性の差異について検討を行う。計算には、汎用の回路シミュレーションのツールである SPICE を用いた。Fig. 3 にシミュレーションに使用した直交磁心の SPICE モデルを示す^{15)~17)}。図中の L_1, L_2 は線形インダクタンスであり、 L_1 を流れる電流 i_{10} は一次の磁心磁束に、 L_2 を流れる電流 i_{20} は二次の磁心磁束に比例するものである。 F_1, F_2 はいずれも電流 i_{10} と i_{20} 双方により制御される非線形従属電流源であり、これにより直交磁心の一次と二次の相互作用を表現している。 R_1, R_2 は一次および二次巻線抵抗である。なお、先に報告した SPICE モデルにおいては、鉄損の影響もある程度考慮したが、ここでは出力電流歪みと力率に主眼をおくこととし、これらの特性は直交磁心の磁化特性でほぼ決定されることから、鉄損は無視した。

Fig. 4 は、三相結線時の特性算定のための計算モデルである。簡単のため三相インバータの代わりに方形波電圧源を使用した。同図において、直交磁心の一相当たりの一次および二次電圧 e_1, e_2 、一次および二次電流 i_1, i_2 、さらに二次側の線電流 i_u を計算し、次式に基づいて一相当たりの一次および二次電力 P_1, P_2 、ならびに二次線電流実効値 I を求める。

Fig. 3 Numerical model of the orthogonal-core used in the SPICE simulation.

$$P_1 = (1/T) \int_0^T e_1 \cdot i_1 dt \quad [\text{W}] \quad (1)$$

$$P_2 = -(1/T) \int_0^T e_2 \cdot i_2 dt \quad [\text{W}] \quad (2)$$

$$I = \sqrt{(1/T) \int_0^T i_u^2 dt} \quad [\text{A}] \quad (3)$$

これらの結果から、次式により、効率 η および出力側からみた実効的な力率 λ を計算した。

$$\eta = (P_2/P_1) \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$\lambda = (3P_2/\sqrt{3}EI) \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

ここで E は二次線間電圧実効値である。また出力電流歪み率は、上記の線電流 i_u の高調波成分を高速フーリエ

Fig. 4 SPICE implementation of the orthogonal-core type three-phase dc-ac converter.

Table 1 Dimensions of the core and number of turns in the windings of the orthogonal-core used in the simulation

Two orthogonal-flux type	
Dimension(mm)	a=25, b=40, c=42, d=85, e=90, g=25, h=100
Winding(turns)	N ₁ =200, N ₂ =200

変換により求め、21 次の高調波成分まで考慮して計算した。

3.2 計算結果

シミュレーションには、先に報告した文献 16 で使用した 2 重直交磁心を用いた。Table 1 にその諸元を示す。本磁心の計算モデルの具体的な回路定数は文献 16 を参照されたい。

計算における電源電圧値は、結線法にかかわらず、一相当当たりの最大出力が単相の場合と等しくなるように選んだ。Table 2 に計算の際に設定した一次および二次の線間電圧実効値を示す。

Fig. 5 に出力電流歪み率対出力特性を示す。図中には比較のため単相の場合の特性も示した。横軸は一相当当たりの最大出力 P_{2m} に対する出力 P_2 の比で示した。これをみると、単相と比較して三相では、いずれの結線においても出力電流歪みは改善される。これは Δ 結線の場合、直交磁心の二次電流 i_2 に含まれる第 3 調波成分は Δ 結線内を還流するため線電流には現れないこと、Y 結線

Table 2 Operating voltages used in the simulations

Connection	Line voltage (V)		Output power (W/phase)
	primary	secondary	
$\Delta - \Delta$	131.7	100	444.1
$\Delta - Y$	126.1	173.2	445.2
$Y - \Delta$	203.6	100	445.4
$Y - Y$	213.8	173.2	444.1
1 phase	100	100	446.6

Fig. 5 Simulation results of the variations of the distortion factor of the output currents.

においては、中性点が接地されていない場合、線電流には第 3 調波成分が流れ得ないことに起因すると考えられる。三相結線の中では、Y- Δ 結線あるいは Y-Y 結線の場合の低減効果が大きいことがわかる。

Fig. 6 に力率対出力特性を示す。これをみると、三相の場合の力率は単相と比較しておおむね改善される傾向にある。これは出力電流歪み率と同様に線電流中に第 3 調波成分が現れないことに起因すると考えられる。各結線方式で比較すると、 Δ - Δ 結線および Y-Y 結線の場合の力率が比較的良好であることが認められる。

Fig. 7 に効率を示す。同図のように、三相結線時の効率は、Y-Y 結線において、広い動作範囲にわたり、若干の改善が認められているものの、全体としては単相の場合と大きな差異は認められなかった。

4. 実験

3 章の結果に基づき、ここでは実験的検討を行った。実験においては、実規模の装置における特性の検証を目的とし、磁心としては製作および組み立ての比較的容易な U 形直交磁心を用いた。Table 3 に、実験に用いた磁心寸法および巻数を示す。本磁心の最大出力は、1 kW 程度である。

Fig. 8(a) に、これらの直交磁心で構成した 3 組の回路の単相における電力変換特性を示す。同図 (b) には各相の歪み率、力率、効率対出力の関係を示す。これらの図に示すように、変換電力は 3 組の回路で差異が認められるが、歪み率、力率および効率については、ほぼ同様の特性を示していることがわかる。以下に述べる三相結線時との比較には 3 組の中で平均的な特性を示した V 相のものを使用した。

Fig. 6 Simulation results of the relations between the output power factor and output power.

Fig. 7 Simulation results of the relations between the efficiency and output power.

Table 3 Dimensions of the core and number of turns in the windings of the orthogonal-core used in the experiments.

Two c-core type	
Dimension(mm)	a=35, b=35, c=42, d=105
Winding(turns)	N ₁ =400 , N ₂ =200

三相結線時の動作電圧は、シミュレーションと同様、それぞれの結線における最大出力が一致するように選んだ（実験においては三相全出力で約3kWとなるように選んだ）。Table 4 に実験の際に設定した一次および二次の線間電圧実効値を示す。

Fig. 9 に出力電流歪み率対出力特性を示す。実験における P_2 および P_{2m} は、三相の場合には三相全出力を3で割った平均値を使用した。これを見ると、いずれの結線方式においても、出力電流歪みは単相と比較して改善される。各結線方式で比較すれば、Y-Δ結線およびY-Y結線の場合において歪み率が小さいことがわかる。この傾向は、シミュレーション結果と一致する。

Fig. 10 に力率対出力特性を示す。これを見ると、シミュレーション結果にみられたように、三相結線時には

(a)

(b)

Fig. 8 Power conversion characteristics measured in the orthogonal-cores used in the experiments. (a) Power versus phase angle relations. (b) Efficiency, power factor and distortion factor of the output currents.

Table 4 Operating voltages used in the experiments

Connection	Line voltage (V)		Output power(kW)
	primary	secondary	
Δ - Δ	205	100	2.97
Δ - Y	200	173.2	2.91
Y - Δ	335	100	3.02
Y - Y	340	173.2	3.05

力率が単相と比較して改善される傾向が認められる。実験結果ではΔ-Δ結線における力率がおおむね良好であった。

Fig. 11 に効率を示す。同図を見ると、シミュレーション結果と実験結果は、その傾向において大略一致する

Fig. 9 Distortion factor of the output line currents of the three-phase orthogonal-core type dc-ac converter.

Fig. 10 Output power factor of the orthogonal-core type three-phase dc-ac converter.

Fig. 11 Efficiency of the orthogonal-core type three-phase dc-ac converter.

が、実験結果によると、結線方式の違いによる効率の差異は余り認められなかった。

これらの実験結果と3章のシミュレーション結果を比較した場合、シミュレーションと実験に使用した直交磁心の形状が異なること、シミュレーションにおいては

直交磁心の磁化特性を磁束の5次式で近似しているが、実際の直交磁心の磁化特性を不飽和・飽和領域ともに高精度に近似するためにはより高次の項まで考慮する必要があること、実験においては、使用した6個の直交磁心の特性が不均一であることなどの理由から、定量的には差異が認められるが、定性的には大略一致していると考えられる。したがって、直交磁心形 dc-ac 変換器の三相化を図る場合の結線法としては、Y-Y 結線が比較的望ましいと考えられる。

5. まとめ

以上、直交磁心の三相化について、特に結線方式の違いによる特性の差異について、シミュレーションと実験の両面から種々検討を行った。シミュレーション結果と実験結果はほぼ同様の傾向を示した。三相と单相を比較すれば、効率については大きな差異はないと思われるが、出力電流歪みおよび力率は三相結線の方が改善される。各結線方式で比較した場合、総合的にみると、Y-Y 結線の場合において比較的良好な特性が得られることが明らかになった。

今後の課題としては、最適設計を目的としたシミュレーション精度の向上と、実用化のためには装置のコンパクト化を図る必要がある。さらに特性面だけでなく実系統に即した結線方式と保護方式の検討も必要と考えられる。これらの事項については現在検討中である。

文 献

- 1) 武田: 電気学会論文誌, **102**, 1132 (1982).
- 2) 関, 小川, 赤尾, 矢崎: 電気学会講演論文集, No. 528 (1985).
- 3) 原島, 稲葉, 高島: 電気学会講演論文集, No. 531 (1985).
- 4) 北村, 小川, 後長, 日和, 大嶋, 佐野: 電気学会講演論文集, No. 534 (1985).
- 5) 高橋, 板井, 細川, 武田: 電気学会講演論文集, No. 1185 (1985).
- 6) 斎藤, 檜垣: 電気学会講演論文集, No. 511 (1986).
- 7) 岡, 国吉, 北條, 安田: 電気学会講演論文集, No. 1203 (1987).
- 8) 白石, 萩原, 徳田, 松川, 栗尾: 電気学会講演論文集, No. 1204 (1987).
- 9) ノノ倉, 前田, 高橋, 村上: 日本応用磁気学会誌, **10**, 351 (1986).
- 10) ノノ倉, 上野, 前田, 高橋, 村上: 日本応用磁気学会誌, **11**, 355 (1987).
- 11) ノノ倉, 前田, 高橋, 村上: 電気学会論文誌, **107-D**, 1507 (1987).
- 12) ノノ倉, 前田, 三田村, 高橋, 村上: 電気学会論文誌, **108-D**, 151 (1988).
- 13) ノノ倉, 田島, 村上: 日本応用磁気学会誌, **12**, 355 (1988).
- 14) O. Ichinokura, M. Maeda, H. Takahashi and K. Mura-

- kami: *IEEE Trans. Magn.*, **24**, 1969 (1988).
- 15) 佐藤, 田島, 一ノ倉, 秦泉寺: 電子情報通信学会技術研究報告, **90**(199), 23 (1990).
- 16) 佐藤, 一ノ倉, 田島, 秦泉寺: 日本応用磁気学会誌, **15**, 513 (1991).
- 17) O. Ichinokura, K. Sato, K. Tajima and T. Jinzenji: *J. Appl. Phys.*, **69**, 4928 (1991).
- 1991 年 11 月 12 日受理, 1992 年 1 月 30 日採録**