直交磁心形 DC-AC 変換器を用いた 太陽光発電システムに関する実験と考察

Experimental Considerations on a Photovoltaic Power System Using Orthogonal-core Type DC-AC Converter

一ノ倉理・前田 満*・高橋宏郎*・村上孝一 東北大学工学部, 仙台市荒巻字青葉 (〒980)
*東北電力総合研究所, 仙台市中山 (〒980)

O. Ichinokura, M. Maeda*, H. Takahashi* and K. Murakami
Faculty of Engng., Tohoku Univ., Aoba, Aramaki, Sendai, 980
*Tohoku Electric Power Co. Inc., Nakayama, Sendai, 980

The orthogonal-core type DC-AC converter exhibits desirable features which include excellent isolation and good controllability. This paper describes the application of the DC-AC converter to a photovoltaic power system which connects the solar cells to the ac line. The results obtained in the trial system using the solar cells and a solar cell simulator indicate that the photovoltaic power system has the following features: simple construction, high reliability and ease of maintenance. The photovoltaic power system presented here is useful for a residential interconnection system.

1. ま え が き

近年, 太陽光発電システムの開発が進められ, 数 kW の家庭用システムから 1000 kW 級の発電プラントの実用化研究が行われている。これらの発電システムにおいて, 太陽電池と既存の交流系統を連系する場合, 太陽電池の発生電力が不規則であるため信頼性の高い連系用変換器が要求される。

筆者らは, この用途に適する変換器として, 直交磁心と方形波インバータで構成される DC-AC 変換器を提案した^{1)~4)}。

本論文は, このような直交磁心形 DC-AC 変換器を用いた太陽光発電システムの開発を目的とし, 1.2 kW 程度の最大出力を有する太陽電池に対応できる連系システムを試作し, 太陽光模擬発電および実太陽光発電による連系運転特性について種々検討を行ったものである。

その結果, 直交磁心形 DC-AC 変換器を用いた太陽光発電システムにおいては, 太陽電池の出力が不規則に変動しても連系運転特性は良好であること, これらの出力変動に伴う交流系統電圧の変動は小さいことなど, 本システムが構成簡単で信頼性が高く運転保守も容易であることなどの特徴を有することが明らかになった。

本論文はこれらの成果について報告するものである。

2. 直交磁心形 DC-AC 変換器の動作特性

Fig. 1 (a) に実験および考察に用いた直交磁心の形状を示す。磁心材料は 0.35 mm 厚方向性ケイ素鋼板を使用し, 磁心質量は 14.4 kg である。Fig. 1 (b) は巻線配置であり, N_1 , N_2 は各々一次および二次巻線を示す。図中の ϕ_1 , ϕ_2 はこのときの一次および二次の磁束の流れを概略的に示したものである。

Fig. 2 に, このような直交磁心を用いた DC-AC 連系用変換器の回路構成を示す。直交磁心の一次側は方形波インバータで励磁され, 二次巻線は既存の配電線などの交流系統に接続される。インバータはトランジスタ方式とし, 出力電圧 e_1 の位相角は交流系統電圧 e_2 に対して進み可変となるようにしている。直流側の LC 回路は, インバータに対して直交磁心が誘導性負荷となることに

Fig. 1 Schematic diagram of the orthogonal core.

Fig. 2 Circuit configuration of the orthogonal-core type DC-AC converter.

より発生する脈動電流を抑制するためのものである。

Fig. 3 に、直流入力電圧値 E_d および交流系統電圧値 E_2 を一定とし、インバータの出力電圧 e_1 の交流系統電圧 e_2 に対する進み位相角 θ を変えた場合の電力変換特性を示す。実線で示される P_d は直流入力電力、 W_1 は直交磁心の一次電力、 W_2 は交流系統に供給される電力を示す。破線で示される η_i はインバータの効率、 η_t は直交磁心の効率、 η は変換器効率であり各々次式で算出される。

$$\eta_i = 100 (W_1 / P_d) \quad (1)$$

$$\eta_t = 100 (W_2 / W_1) \quad (2)$$

$$\eta = 100 (W_2 / P_d) \quad (3)$$

Fig. 3 を見ると、 θ を 90° から 135° の範囲で調整すれば直流系統から交流系統に供給される電力が 0 から最大値まで容易に制御されることが了解される。以下、このような直交磁心形 DC-AC 変換器を用いた太陽光発電システムについて述べる。

Fig. 3 Power versus phase angle relation obtained in the DC-AC converter.

Fig. 4 Block diagram of the photovoltaic power system.

3. 太陽光発電システムの基本構成

一般に、太陽電池の最大出力は日射により大きく変動する。従って、直交磁心形 DC-AC 変換器の入力直流源として太陽電池を使用する場合、不規則な発生電力を有効に利用するためには太陽電池の発電状況に応じてインバータの位相調整を行う必要がある。

Fig. 4 にこのような連系制御システムの基本構成を示す。図において、日射レベルがある設定値以上であれば開閉器が投入され、直交磁心の二次側が交流系統に接続される。ただし、瞬時的な日射上昇に対する投入を避けるため日射検出と開閉指令の間に数秒程度の時限を設け、日射レベルがこの設定時間以上持続した場合に開閉器が閉じるようにした。連系後は太陽電池の発電量に応じてインバータの出力電圧の位相角を制御することにより太陽電池から交流系統に供給される電力を調整している。

Fig. 5 に位相制御のための回路を示す。本回路はツーンの移相回路を構成しており R_1, R_2 および R_v, R_i の合成抵抗値が減少すれば、交流系統電圧 e_2 を基準としてインバータのドライブ信号電圧 e_2' およびこれに同期するインバータの出力電圧の進み位相角は増加する。 R_v および R_i は LED と CdS による光結合回路におけ

Fig. 5 Phase controlling circuit.

る CdS の抵抗値であり、LED 入力電圧 ($k_1 E_d$) および ($k_2 I_d$) は各々太陽電池の出力電圧 E_d および出力電流 I_d の検出信号を示す。 E_d の増加に対しては R_v 、 I_d の増加に対しては R_1 が減少し、合成抵抗値が減少するためインバータの出力電圧の進み位相角は増加する。 R_1 および R_2 は各々位相角の下限および上限を 90° および 135° に設定するための固定抵抗である。

いま、このような連系制御システムにおいて開閉器が閉じた場合、太陽電池の出力電圧 E_d により R_v が減少するため、インバータの出力電圧の位相角は 90° から増加し、太陽電池から交流系統に電力が供給される。したがって出力電流 I_d が増加して抵抗 R_1 が減少する。このときの太陽電池の動作点は比較的定電圧の領域にあるため R_1 の減少は位相角と供給電力をさらに増加させる。この正帰還により太陽電池から交流系統に供給される電力は漸次増大する。この電力がそのときの日射で決められる最大電力値を越えると太陽電池の出力電圧は急激に減少するため R_v が増加し、インバータの位相角が減少するという負帰還が働き、電力の増大は制限される。したがってこのような帰還制御系の増幅度および時定数を適当な値とすれば、供給電力はそのときの太陽電池の最大出力に大はば一致し、日射が変動しても太陽電池の動作点がその最大出力点を追従するような制御が可能となる。

4. 太陽光発電システムの動作特性

以上の考えに基づき、最大出力が 1.2 kW (132V, 9.02 A) の太陽電池に対応できる単相の連系制御システムを試作し、太陽光模擬発電および実太陽光発電による運転特性について検討を行った。直交磁心は Fig. 1 に示されたものを用い、帰還制御回路は IC 演算増幅器などを用いた簡単なものとした。

Fig. 6 に、太陽光模擬発電装置の構成を示す。光発

Fig. 6 Configuration of the solar cell simulator.

Fig. 7 Output characteristics of the simulator.

電センサーとして用いている小容量の太陽電池の出力電圧および電流を検出し、可変直流電源の出力電圧および電流を制御することにより、上記の太陽電池の出力特性を大略模擬するような E_d - I_d 特性を得ている。Fig. 7 に、種々の日射レベルにおいて測定された E_d - I_d 特性を示す。図中の E_e は熱電対方式の日射計により測定した太陽光のエネルギー密度を示す。

Fig. 8 に、太陽光模擬発電装置を使用し、日射レベルが 0 から最大値の 90% 程度まで上昇したときのシステムの連系制御特性を示す。 P_d は各日射レベルにおけ

Fig. 8 Control characteristics obtained by using the simulator.

Fig. 9 Response curves when the solar radiation changes.

る直流電力であり E_d はそのときの直流系統電圧値を示す。 W_1 は直交磁心の一次電力、 W_2 は交流系統への供給電力であり η は(3)式で算出される変換効率を示す。 θ はインバータの出力電圧の位相角であり E_2 は交流系統電圧値を示す。同図より、20%以上の日射でシステムは連系し、日射の上昇に対して直流から交流系統に供給される電力が増加することなどシステムが所期の制御動作を行っていることが了解される。このときの交流系統電圧値はほぼ一定値に保持されている。

Fig. 9 は日射の急変に対するシステムの応答特性の

Fig. 10 Operation characteristics obtained by using the actual solar cells.

測定例である。すなわち、Fig. 6 の模擬発電装置において、光発電センサーとして使用した太陽電池の日射を急激に遮へいあるいは照射した場合のシステムの電圧、電流の変化を観測したものである。ここで日射検出と開閉指令間の時限は5秒程度とした。また、インバータの動作は継続させている。図において、①および③が日射の遮へい点および照射点であり、これらの点から約5秒後の②および④が開閉器の解列および併入点である。 I_d は直流入力電流、 i_1 は直交磁心の一次電流であり i_2 は二次電流を示す。これを見ると、日射の急変によるシステムの交流系統からの分離あるいは連系に伴う二次電圧の変化は小さいこと、これらの分離および連系動作は簡単かつ安全に行われていることがわかる。

以上のような模擬発電による検討結果に基づき、現在実太陽光発電による検証試験を行っている。Fig. 10 は、このような実太陽光発電によるシステムの電圧および電力の時間変化の測定例を示す。同図より、日射が不規則に変動してもシステムの運転特定は良好であることが了解される。

5. あとがき

直交磁心形 CD-AC 変換器を用いた太陽光発電システムは以下の特徴を有することが明らかとなった。

- (1) 簡単な制御で不規則な発生電力の有効利用が可能。
- (2) 信頼性かつ安全性が高く運転保守も容易。
- (3) 構成簡単であるため価格の低減が期待できる。

一方改善すべき事項として、直交磁心形 CD-AC 変換器は磁心の飽和特性を利用しているため低力率で高調波電流の発生が無視できないことである。これらの改善策については現在検討中である。

文 献

- 1) 村上、一ノ倉：電気学会全国大会講演論文集，664 (昭57)。
- 2) 一ノ倉，菊地，村上：日本応用磁気学会誌，7(2)，135-138 (1983)。
- 3) O. Ichinokura, S. Kikuchi and K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-19** (5), 2103-2105 (1983)。
- 4) 一ノ倉，村上：日本応用磁気学会誌，9(2)，247-250 (1985)。

1985年12月28日受理，1986年2月27日採録