高調波低減型ブラシレス二次励磁方式可変速誘導発電機の特性

学生員 加藤 真嗣 (茨城大) 正員 星 伸一 (茨城大)
正員 大口 國臣 (茨城大)

Characteristics of Variable-Speed Cascaded Induction Generator System with Reduced Harmonic Currents

Shinji Kato, Student Member, Nobukazu Hoshi, Member, Kuniomi Oguchi, Member (Ibaraki University)

A novel brushless variable-speed induction generator system is proposed for small-scale hydroelectricity. The stator of the second induction generator has six-phase windings connected with a twelve-pulse rectifier system to reduce adverse effects of lower-harmonic currents. The simulation results show that the first induction generator can produce nearly sinusoidal currents.

キーワード：可変速誘導発電機，高調波低減，二重三相巻線，トルク脈動，カスケード接続，ブラシレス

1. ま え が き

クリーンな自然エネルギー源としてさらに積極的な活用が期待される水力は，国内に2,400余りの未開発地点を有している。しかし，それらの大部分は山間僻地に散在するため保守が容易でなく，その上，中小規模であるので，コスト的に割高になる問題がある⁽¹⁾。このため，低コストで，しかも無保守化が可能な発電方式の開発が強く望まれている。

著者らは先に，2台の巻線形誘導機をカスケード接続し，第2誘導機固定子側にダイオード整流器をブラシレスで接続するカスケード型ブラシレス二次励磁方式可変速誘導発電機を提案した⁽²⁾。誘導機のカスケード接続は以前から知られた方式であり，電動機として，ブラシレスセルビウス方式⁽³⁾⁽⁴⁾の実用化例⁽⁵⁾がある。しかし，中容量の可変速二次励磁方式発電機のニーズがなかったこともあり，発電機としての実用化例はない。ことに，入力電流中の第5，第7次調波成分の影響が除去される12パルス整流回路と結合したシステムについては全く報告されていない。そこで，本レターでは，上述の高調波対策を講じたカスケード接続誘導発電機における高調波電流の低減効果を明らかにする。

2. 発電システムの構成と高調波低減法

図1に示すように，2台の三相誘導機をカスケード接続し，第2誘導機固定子側は，空間的に電気角 30° 位相差をもつ2組の三相巻線とし，それぞれに接続された三相ダイオードブリッジ整流回路(Rec1とRec2)を直流側で直列接続する。ブラシ付き誘導機を用いた方式⁽¹⁾と同様に再生インバータ前段の昇圧チョップパの通流率を調整して，直流電流 I_d を制御する。

第1，第2誘導機の極対数をそれぞれ p_1, p_2 ，電源周波数を f ，第1誘導機における回転子のすべりを s_1 ，カスケード時のすべり $s_1 s_2 (= s_k)$ を用いると回転子の角速度 ω_r は次式で表わされる⁽³⁾。

図1 提案システム

Fig. 1. Proposed system.

$$\omega_r = \frac{2\pi f}{p_1} (1-s_1) = \frac{2\pi f}{p_1 + p_2} (1-s_1 s_2) = \omega_0 (1-s_k) (1)$$

ここで， $\omega_0 = 2\pi f / (p_1 + p_2)$ 。カスケード時同期角速度 ω_0 より高速域，すなわち，カスケード時のすべり s_k が負の範囲で発電機として動作する。すべりが $-p_2/p_1 < s_k < 0$ で，発電機動作時のパワーフローを図1中の太い矢印で示した⁽⁴⁾。

IG2固定子の2組の三相巻線電流は互いに 30° 位相差の台形波になり，周波数 $s_k f$ の基本波電流成分のほかに，周波数 $|1 \pm 6m| s_k f$ の高調波電流を含む(m : 正の整数)。しかし，2組の三相巻線は空間的に 30° 位相差があるので， m が奇数の $|1 \pm 6m|$ 次高調波起磁力が相殺される結果，残留起磁力高調波は $|1 \pm 12m|$ 次成分(m : 正の整数)だけとなる。とくに，低次高調波である第5，第7次成分の影響がIG2固定子側で相殺される効果が大きい。この方式はIG2固定子側にPWM整流器を用いる方式⁽⁶⁾に比べ，対応する変換回路がダイオードだけで構成され，さらに，すべり周波数 $(s_1 s_2 f)$ 検出回路が不要であるので，主・制御回路ともに簡素化され，低コストで実現できる。

3. シミュレーション結果

635kVA, 6.6kV, 55.5A, 50Hz, $p_1 = p_2 = 2$ の装置の設計数を用い、図1の構成でインバータ部を直流電圧源で模擬した場合について、シミュレーションを行った。このように一部を簡略化しても、このシステムは2台の誘導機、整流器と昇圧チョッパ回路を含む複雑な構成なので、PSpiceやMATLABなどパワーエレクトロニクスシステムのシミュレーションに適用されているソフトでは、そのシミュレーションは容易ではない。そこで、誘導機とダイオードなどの半導体素子を修正節点解析法で定式化し、C++言語で作成したプログラム⁽⁷⁾を用いて得られたシミュレーション結果のうち、 $s_k = -0.1$ (825rpm) の場合を、同じ条件で6パルス整流回路を適用した場合の結果と比較検討してみる。

図2に示すように、第2誘導機固定子電流は対応する相では互いに 30° 位相差の台形波になる。第1誘導機固定子電流において、6パルス整流システムの場合、 $|1 \pm 6ms_k|f$ の高調波電流成分が発生する。 $s_k = -0.1$ のとき、 $m = 1$ の成分は、 $1.6f, 0.4f$ となる。スペクトル解析を行うと、それぞれの含有率は、図3(a)の場合は8.4%, 3.7%である。これに対し、図3(b)の提案システムの場合は両成分ともほぼ0.1%に低減されていて、この結果、図3(a)に見られる低周波脈動が図3(b)ではほぼ消去されていることがわかる。さらに、発生トルク波形を示した図4(a)と図4(b)を比較すると、6パルス整流方式では第2誘導機発生トルク T_2 の脈動分が約460N・mであるのに対し、提案方式では約200N・mと約43.5%に減少するとともに、脈動周波数も2倍になっていることがわかる。

このとき、図1に矢印で示したパワーフローにおいて、 $P_m = P_{m1} + P_{m2} = 257.7\text{kW}$, $P_{s1} = 225.4\text{kW}$, $P_{s2} = P_{s21} + P_{s22} = 22.6\text{kW}$ 、したがって、発電機の効率は $\eta = (P_{s1} + P_{s2})/P_m = 96.2\%$ (鉄損と機械損を無視) である。

4. むすび

低コストなブラシレス可変速誘導発電機システムを実現するために、比較的小容量で回路構成が簡単な電力変換装置を用いる高調波低減方式を提案し、その効果を明らかにした。カスケード接続に伴う入力力率の低下は回生用インバータを用いて補償することができる。このようなシステム全体の特性改善については、次の機会に報告したい。

(平成13年3月23日受付, 平成13年12月19日再受付)

文 献

- (1) 内田, 櫻井, 小野, 根本, 山口, 井手:「誘導発電機を用いた小水力用新可変速発電システムの開発」, 回転機研究会, RM-00-111 (2000)
- (2) 大口, 加藤, 星, 久保田:「低コストなブラシレス二次励磁可変速誘導発電機システムの構成」, 平成12年度電気学会東京支部次城支部研究発表会 B06, pp.45-46 (2000)
- (3) 野中, 大口:「ブラシなし静止セルビウス方式の特性」, 電気学会論文誌, Vol.92-B, pp.241-249 (1972)
- (4) 野中, 大口:「自励式可逆コンバータを用いたブラシなし静止セルビウス方式」, 電気学会論文誌, Vol.97-B, pp.127-134 (1977)
- (5) 野田, 広, 堀:「誘導電動機のブラシレスセルビウス制御」, 日立評論, Vol.55, pp.640-645 (1973)
- (6) B. Hopfensperger, D.J. Atkinson, R.A. Lakin:「Application of vector control to the cascaded induction machine for wind power generation schemes」, Proceedings of European Power Electronics Conference (EPE'97), Vol.2, pp.701-706 (1997)

図2 提案システムのIG2固定子電流

Fig. 2. Stator current waveforms of the second generator (twelve-pulse rectifier system).

(a) 6パルス整流システム

(b) 提案システム

図3 IG1固定子電流

Fig. 3. Stator current waveforms of the first generator.

(a) 6パルス整流システム

(b) 提案システム

図4 トルク波形

Fig. 4. Torque waveforms.

- (7) 加藤, 星, 大口:「修正節点法によるパワーエレクトロニクス回路のシミュレーション」, 電気学会 半導体電力変換・産業電力電気応用合同研究会資料, SPC-00-89, IEA-00-64 (2000)