A Study of Generator System Selection for Large Wind Turbine Generator System

Mamoru Kimura Member (Hitachi, Ltd., makimura@gm.hrl.hitachi.co.jp)

Kazumasa Ide Senior Member (Hitachi, Ltd.)

Kazuo Nishihama Member (Hitachi, Ltd.)

Motoo Futami Member (Hitachi, Ltd.)

Masaya Ichinose Member (Hitachi, Ltd.)

Tetsuo Fujigaki Non-member (Hitachi, Ltd.)

Motonobu Iizuka Non-member (Hitachi, Ltd.)

Kazuhiro Imaie Non-member (Hitachi, Ltd.)

Yasuomi Yagi Member (Hitachi, Ltd.)

Junji Tamura Member (Kitami Institute of Technology.)

Keywords: wind turbine generator, system efficiency, running cost

This paper focuses on selection of wind turbine generation systems that include generators, converters and gears. We study

Fig. 1. Wind turbine system

Fig. 2. Flow chart for estimation of system efficiency

three systems (Fig. 1): permanent magnet generator (PMG) system, doubly-fed generator (DFG) system and synchronous generator (SYG) system in terms of the system efficiencies and running costs. Figure 2 shows flow chart for estimation of system efficiency. The system efficiencies are calculated with considering mechanical loss, iron loss, copper loss, and stray loss of three types generator systems.

Figure 3 shows comparison of electric power generation per year. These results are calculated with considering relation between wind power and wind condition. According to these results, the 1-step gear PMG system is the best choice to large wind turbine system.

Fig. 3. Comparison of electric power generation per year

大容量風力発電システムにおける発電機選定の一考察

正員 木村 守* 上級会員 井出 一正*
 正員 西濱 和雄* 正員 二見 基生*
 正員 一瀬 雅哉* 非会員 藤垣 哲朗**
 非会員 飯塚 元信** 非会員 今家 和宏**
 正員 八木 恭臣** 正員 田村 淳二***

A Study of Generator System Selection for Large Wind Turbine Generator System

Mamoru Kimura*, Member, Kazumasa Ide*, Senior Member, Kazuo Nishihama*, Member, Motoo Futami*, Member, Masaya Ichinose*, Member, Tetsuo Fujigaki**, Non-member, Motonobu Iizuka**, Non-member, Kazuhiro Imaie**, Non-member, Yasuomi Yagi**, Member, Jyunji Tamura***, Member

This paper focuses on selection of wind turbine generation systems that include generators, converters and gears. We study three systems: permanent magnet generator (PMG) system, doubly-fed generator (DFG) system and synchronous generator (SYG) system in terms of the system efficiencies and running costs. The system efficiencies and running costs are calculated with considering relation between wind power and wind condition. According to these results, the 1-step gear PMG system is the best choice to large wind turbine system.

キーワード：風力発電，システム効率，ランニングコスト

Keywords: wind turbine generator, system efficiency, running cost

1. まえがき

1997年12月COP3（地球温暖化防止京都会議）の議定書により，温室効果ガス削減の数値目標が取り決められ二酸化炭素（CO₂）の排出量が制限される中，化石燃料を使用しない自然エネルギーを用いた発電設備に注目が集まっている。自然エネルギーを用いた発電設備としては，太陽光発電，風力発電，地熱発電及び水力発電等が上げられるが，その中でも風力発電は現在世界中で注目の的となっている⁽¹⁾⁽²⁾。特に，近代風力発電と呼ばれる航空力学を応用して揚力を使用する風車が開発されると導入量は飛躍的に拡大し，過去5年間は年間平均32%の成長率で推移し，最も急激に成

長している^{(3)~(5)}。

このような中で，風況の良いつまり強い風が一年中吹いている風力発電に最も適している場所（IEC61400 Class1：年平均風速10 m/s以上）は少なくなり，平均風速が7 m/s程度（Class2, Class3）の比較的平均風速の低い場所への建設が進められる状況になってきた⁽⁶⁾。そのため，平均風速が低い場所でも発電電力量をより効率的に取り出すことのできる発電システムの要求が高まっている。そのため，これまで用いられてきた一定速のかご型誘導発電機を用いた風力発電システムでは，低風速域における高効率運転が困難なため，低風速域でも効率のよい可変速風力発電システムが望まれている⁽⁷⁾。

可変速風力発電システムは，現時点では永久磁石同期機（PMG），交流励磁同期機（DFG），直流励磁同期機（SYG）をギアレス，ギア有り等，各社各様で開発を進めており，例えばNational Renewable Energy Laboratory（米国）より風車やギアのコスト，効率等の機械系の検討が発表されている⁽⁸⁾。しかしながら，風速出現頻度，発電機システムの負荷に対する効率特性を考慮した，ランニングコストを試算した報告例は無いように思われる。

本論文は，上記のような各方式を，機能的特長，ランニングコスト，イニシャルコスト等の点から評価し，現在各

*（株）日立製作所 研究開発本部 日立研究所
〒319-1292 日立市大みか町 7-1-1

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.
7-1-1, Omika-cho, Hitachi 319-1292

**（株）日立製作所 電力グループ 日立事業所
〒317-8511 日立市幸町 3-1-1

Hitachi Works, Power Systems, Hitachi Ltd.
3-1-1, Saiwai-cho, Hitachi 317-8511

*** 北見工業大学 工学部 電気電子工学科
〒090-8507 北見市公園町 165 番地
Kitami Institute of Technology
165, Koen-cho, Kitami 090-8507

国でオフショア向けとして検討されている大容量次世代機 5MW 風力発電システム⁹⁾を対象とし、PMG、DFG、SYG を用いてギアを考慮した検討結果について報告する。

2. 検討方法

〈2・1〉 風力発電システム 図1に、現在最も一般的な可変速風力発電システムの概略を示す。各々の特徴を下記する。

(a) 交流励磁同期発電機 (DFG)

風車の回転速度を増速ギアを用いて高速化している。発電機の定格回転数は 1000~1500(min⁻¹) が主流。可変速運転ができ、電力変換器が回転子の励磁分の容量で済むことから低コスト化が図れ、現在の風力発電システムの主流となっている。

(b) 直流励磁同期発電機 (SYG)

風車に数十~百極程度の発電機が直結され、発電機容量と同容量の電力変換器にて系統に接続されている。ギアを用いないためギアに起因する騒音やメンテナンス費を低減することができる。

(c) 永久磁石式同期発電機 (PMG)

SYG と同様に風車に多極発電機が接続されており、発電機容量と同容量の電力変換器にて系統に接続されている。PMG では SYG の利点のほかに、スリップリング等がないため更なるメンテナンス費を低減することが可能となる。ロータ側の損失がないことから高効率化が可能となる。また、ギアを用いて発電機回転数を高速化している使用例もある。

以上、三機種について検討を行う。

〈2・2〉 設計指針 今回の対象機は今後の風力発電システムの大型化を考え、出力 5MW の発電システムとして検討を行った。ギアレス SYG、PMG では回転数が 6~10 min⁻¹ と超低速発電機となり、DFG では、同期速度 1000 min⁻¹、すべり範囲 20%とした。またギアを 1 段当たり 5 倍程度、3 段ギアで定格速度を 1200 min⁻¹ に増速すると仮定した。得られる出力は風速の 3 乗に比例するとし、10rpm 時 5MW、9rpm 時 3.65MW とし検討を行った。

図2に発電システム検討の流れを示す。それぞれの回転機設計法にて、諸元を算出し、機械損、鉄損、銅損、漂遊損の損失を三機種とも同じ算出法で設計し、発電機効率を算出する。さらに変換器効率を各々乗算し、PMG、DFG ではギア効率をさらに乗算することでシステム効率を算出した。部分負荷時の効率も同様に求めた。

今回の考慮されている損失は、鉄損、機械損 (ベアリング損、風損)、銅損、漂遊負荷損である。それぞれに適用した式を下記する。

鉄損 (W_i)

$$W_i = W_h + W_e = K_h(B, f)B^{1.6}f + K_e(B, f)B^2f^2 \dots \dots \dots (1)$$

鉄損は (1) 式に基づき鉄損の計算を行う。鉄損係数 K_e ,

図1 風力発電システム構成例

Fig. 1. Wind turbine system.

図2 発電システム効率算出フロー

Fig. 2. Flow chart for estimation of system efficiency.

K_h は 50 Hz, 60 Hz におけるカタログデータ⁽¹⁰⁾をもとに (2) 式により算出を行う。鉄損はティース部、コアバック部各々について算出し、使用する磁束密度 B は無負荷誘起電圧算出時のティース、コアバック磁束密度を各々使用した。

$$\frac{W}{f} = K_h B^{1.6} + K_e B^2 f \dots \dots \dots (2)$$

機械損 (W_m)

今回考慮した機械損は、ベアリング損と固定子、回転子間ギャップに発生する風損である。以下各々について説明する。

ベアリング損 (W_b)

ボールベアリングの損失については、文献⁽¹¹⁾の算出式を用い、使用するベアリングに応じた摩擦係数にて算出する。また、ベアリングの種類はボールベアリングとし、耐荷重を考慮してベアリング寸法を選択した。

風損 (W_w)

風損は、文献に示す風損の計算式とレイノルズ数と摩擦係数の関係、空気の粘性係数をもとに算出を行った。

銅損 (W_c)

銅損は、一相あたりの銅損として (3) 式に従い算出した。DFG, SYG は回転子銅損 (W_r), 固定子銅損 (W_s) についてそれぞれ算出し, PMG は、固定子銅損のみ算出している。ここで R は一相あたりの巻線抵抗 (Ω), I は電流値 (A) である。

$$W_c = R \cdot I^2 \dots\dots\dots (3)$$

漂遊負荷損 (W_{str})

今回、漂遊負荷損として、誘導電動機の IEEE60034 規格を使用し、発電機の種類によらず (4) 式を用いて算出した。

$$W_{str} = \alpha \cdot P_0 \left(\frac{I_t}{I_{Rt}} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 α は漂遊負荷損評価係数、 P_0 は定格出力 (W), I_t は電流値 (A), I_{Rt} は定格電流値である。評価係数 α は IEEE60034 および JEC2137 を参照し、今回は 5 MW のため 0.009 を使用した。

〈2・3〉 発電機特性 今回の検討の一例として PMG,

図 3 出力-効率特性 (PMG)

Fig. 3. Characteristics of output power vs. efficiency (PMG).

図 4 損失計算結果 (PMG)

Fig. 4. Estimation results of loss (PMG).

SYG, DFG の特性を示す。

(a) PMG

図 3 にギアレス, 1 段ギア, 2 段ギア, 3 段ギアの出カ-効率カーブを示す。同図より、ギアレス PMG の効率は最も高いケースで、定格出力の 20~30%程度まで 95%以上のフラットな効率特性を示すことがわかる。

図 4 にギアレス PMG 損失計算結果を示す。同図より、鉄損が大きく、低出力時の効率低下の原因となっており、また出力増大に伴い、銅損が鉄損を上回ることがわかる。

(b) SYG

図 5 にギアレス SYG 損失計算結果を示す。同図より、鉄損が大きく、界磁を作り出すための 2 次銅損があるため銅損が全領域で大きく、低出力時の効率低下の原因となっている。PMG と比較して銅損が大きいことがわかる。

(c) DFG

図 6 に DFG の出力-効率カーブを示す。DFG の特性としてすべり 0 の点が最も効率が高くなり、すべりが生

図 5 損失計算結果 (SYG)

Fig. 5. Estimation results of loss (SYG).

図 6 損失計算結果 (DFG)

Fig. 6. Estimation results of loss (DFG)

じると回転子鉄損が発生することから効率が低下していく。その結果、可変速範囲を広くすると定格点では効率が低くなる特性になることがわかる。

3. 検討結果

〈3・1〉 システム比較 図7にすべての発電機における効率カーブを示す。同図よりギアレス PMG がすべての領域において効率が上回っていることがわかる。PMG では、回転子銅損がなくなるので、高効率となる結果となった。また1段ギア PMG と3段ギア DFG の効率が同等となっている。この原因としては、PMG が発電機と同容量の変換器を必要とするのに対し、DFG では発電機すべり分の変換器容量ですむことから変換器の損失分効率差が生じているためである。ただし、DFG は、可変速範囲を広く取ることができないデメリットもある。

表1にそれぞれのシステムの体格効率等の比較をまとめた。その結果、回転速度の違いにより、DFG が最も体格が小さくまた軽量であることがわかる。最近の5MW プロトタイプ機を見ると、3段ギア DFG が多く、ナセルの重量を低減することを目的としているものが多い⁽¹²⁾⁽¹³⁾。これは5MW クラスの風車の直径が100mを超え、発電機、ギアが入ったナセルと言う重量物を、高所に設置することが難しいためであり、風車建設時のコストを考えると、発電機だ

けで数百トンとなると現実的ではないと考えられる。よって1段ギア PMG システムおよび3段ギア DFG システムは、高効率でかつ風車建設時のコストを低減することが可能であると考ええる。

〈3・2〉 ランニングコスト比較 風力発電は、自然エネルギーのため常時一定電力を取り出すことは困難である。現時点では、事業成立性を平均風速7m/s以上として評価しているが、いかに低風速域で発電を行えるかで風力発電システム全体の収入が決まるといえる。

発電機効率の違いによる、年間発電量の評価を行った。風速出現分布モデル⁽¹⁴⁾を用い、風車の年間出力量を模擬し、発電機運転範囲等を考慮して算出した。

図8に3段ギア DFG と1段ギア PMG における回転速度と風車効率、平均風速に対する売電価格8¥/kWhと仮定した年間収入差額を示す。PMG は、可変速範囲が広いため、風車を高効率で運転できる。しかしながら DFG は、可変速範囲を20%としているため、平均風速7m/s以下では、可変速範囲を超えることから、回転数を一定として運転している。そのため風車の効率が低風速域では大きく低下している。また、発電機単体の効率特性として、PMG は DFG よりも低速で高効率運転が可能なることから平均風速が低い領域で発電電力量が大きくなる傾向がある。その結果、収入格差は平均風速が5m/s程度の地点に建てた場合が最も大きくなり、年間2.5M¥程度の差になる。

図7 発電システム出力-効率特性

Fig. 7. Characteristics of system output power vs. system efficiency.

表1 体格効率比較

Table 1. Comparison of 5 MW class wind turbine generator system.

Generator		DFG	PMG		SYG
Gear		3-step	none	1-step	none
Generator Diameter	(m)	1.55	10	3	10
Generator Length	(m)	0.75	1.7	1.5	2
Generator Weight	(ton)	8	169	30	308
Generator Capacity	(MW)	5	5	5	5
Converter Capacity	(MW)	1.5	5	5	5
System Efficiency	(%)	92	93	92	92

図8 年間発電電力量比較

Fig. 8. Comparison of electric power generation.

風力発電システムは、ランニングコストとして燃料費がかからないメリットがあるため、発電機の効率差はそのまま、収入格差に反映されるといえる。収入格差はそのままイニシャルコストの償却に当てることが可能となるため、風力発電事業用として今回の検討条件では、1段ギアPMGシステムが最も多様な風況条件に対してコストメリットが大きいと考えられる。

4. ま と め

5MW級次期大容量風力発電システムの選定を想定し、発電機効率、変換器効率、ギア効率を算出することで、発電機システムの重量も加味し、風力発電システムとして最適な組合せを検討した。本検討の結論をまとめると以下のようになる。

(1) 低風速領域での発電量拡大に着目すると、PMGシステムでは回転子銅損がなくなるため低風速領域での発電量拡大が図れることを示した。

(2) DFGシステムは、変換器容量が小さくできることから、発電機容量分の変換器容量を必要とするPMGシステム、SYGシステムと比較すると高効率であることを示した。

(3) 3段ギアDFGシステムと1段ギアPMGシステムの収入格差は、平均風速が5m/s程度の地点に建てた場合が最も大きくなり、年間2.5M¥程度の差になることを示した。

(4) 1段ギアPMGシステムでは、高効率で軽量であることから、風車建設時のコストの問題を解決することが可能であることを示した。

また、本論文は、発電機効率特性を基に風速出現頻度を考慮して、ランニングコストを試算する手順として今後の参照価値もあるものと考えられる。

(平成17年2月8日受付, 平成17年9月6日再受付)

文 献

- (1) 松宮 輝:「風力発電の最新技術動向」, 電気評論, pp.40-44 (2003-10)
- (2) 七原俊也:「世界および日本における風力発電の普及状況と導入支援制度」, 電学誌, Vol.124, No.1, pp.12-16 (2004-1)
- (3) 上田悦紀・井上厚助・柴田昌明・林 義之:「三菱重工の新1000kW風車 MWT-1000A」, 三菱重工技法, Vol.41, No.1, pp.28-29 (2004-1)
- (4) European Wind Energy Association/Greenpeace: “Wind Force12” (2003-5)
- (5) NEDO 新エネルギー開発機構: 風力発電導入ガイドブック (2001-11)
- (6) US Department of Energy: “Wind Power Today” (2003-5)
- (7) 鈴木和夫・前川 聡:「可変速風力発電システム」, 電学誌, Vol.121, No.7, pp.450-453 (2001-7)
- (8) R. Poore and T. Lettenmaier: “Alternative Design Study Report: WindPACT Advanced Wind Turbine Drive Train Designs Study”, National Renewable Energy Laboratory (2003-8)
- (9) “Global wind technology Overview of developments 2003-2004”, Renewable energy world James & James (2004-7)
- (10) 無方向性電磁鋼帯カタログ: 新日本製鐵 (株)
- (11) 転がり軸受総合カタログ: NTN (株)
- (12) “Moving on up The 5M prototype is installed”, Renewable energy world James & James, Vol.7, No.6, pp.94-103 (2004-12)
- (13) “A new drive and generator solution”, Renewable energy world James & James, Vol.7, No.2, pp.84-93 (2004-4)
- (14) 風力発電システムの設計マニュアル: NEDO (2001-3)

木 村 守 (正員) 1974年7月7日生。1999年3月東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻博士課程前期修了。同年4月(株)日立製作所入社。研究開発本部日立研究所に勤務。回転電気機械の研究開発に従事。

井 出 一 正 (上級会員) 1964年1月5日生。1988年3月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程前期課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。主として回転機および分散エネルギーシステムなどの研究開発に従事。現在、研究開発本部日立研究所モータイノベーションセンタ・センタ長。工学博士。日本応用磁気学会会員。IEEE Member。1993年, 2001年電気学会論文賞, 2003年オーム技術賞などを受賞。

西 濱 和 雄 (正員) 1976年12月12日生。1995年3月松山工業高校電子科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。研究開発本部日立研究所に勤務。回転電気機械の研究開発に従事。

二 見 基 生 (正員) 1962年6月11日生。1987年3月室蘭工業大学修士課程電子工学専攻修了。同年4月(株)日立製作所入社。現在、同社日立研究所にてパワーエレクトロニクス機器応用技術に関する研究開発に従事。2003年電気学会論文賞受賞。

一 瀬 雅 哉 (正員) 1969年4月3日生。1995年3月信州大学工学研究科電気電子工学修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。同社日立研究所にて電力用自励式変換器システムの研究開発に従事。2003年電気学会論文賞受賞。

藤 垣 哲 朗 (非会員) 1972年4月3日生。1995年3月東京農工大学工学部電子情報工学科卒業。同年4月(株)日立製作所入社。電力グループ日立事業所に勤務。回転電気機械の設計開発に従事。

飯塚元信（非会員） 1954年5月11日生。1978年3月東京大学工学部電気工学科卒業。同年4月（株）日立製作所入社。電力グループ日立事業所に勤務。回転電気機械の設計開発に従事。

今家 和宏（非会員） 1965年5月8日生。1990年3月同志社大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月（株）日立製作所入社。電力用自励式電力変換システムの設計・開発に従事。博士（工学）。

八木 恭臣（正員） 1954年5月10日生。1979年3月東京大学大学院修士課程修了。同年4月（株）日立製作所入社。超電導磁石、核融合装置、タービン発電機、超電導発電機、風力発電機システム、電気駆動システム等の開発、設計、事業化に従事。この間、1984年1月～12月米国ミシガン大学修士課程修了。現在、電機システム事業部発電機システム技術部部长，兼，海外戦略室室長。1996年電気学会論文賞受賞。

田村 淳二（正員） 1957年1月生。1984年3月北海道大学大学院博士課程修了。現在、北見工業大学電気電子工学科教授。主として、同期発電機、電力システムの安定度、風力発電機の解析に関する研究に従事。工学博士。電気設備学会、日本風力エネルギー協会会員。IEEE Senior Member。