A201 風力発電動力伝達システムに関する研究

A Study on the Power-train of Wind turbine generators

○勝呂 幸男(JWEA), 関 和市(東海大)

Yukio Suguro (JWEA)

ABSTRACT

The Japanese wind power is now being watched with interest of the world, because the national target of wind energy is 3000MW that was proposed in the Primary Energy Supply Plan. In conjunction with these increasing, the power of each unit is also increasing. But the power trains of wind turbines have various kind of types because of the basic background of manufacturers histories. In this paper, I will deals with the general explanation of these power train systems and its facilities and futures. And we must give some consideration to durability, safety and a high performance for wind turbine industries and consequently these consideration will help the next generation wind turbine design and reliabilities.

1. 緒言

風車は翼で空気の運動エネルギーを回転エネルギーに変換し、その回転力はロータハットから主軸を經由してナセル内に設置されている増速歯車を介して、又は直接に発電機を駆動する。この主軸と歯車、又は直結で発電機の回転体系を総称してパワートレイン(動力伝達システム)と呼ぶ。

大型発電用風車の主軸回転数は翼の性能最適値から選定してあるので 15~25rpm と低い。一方、標準的で最も安価な 4 極発電機を採用すると、回転数は 1,500rpm, 又は 1,800rpm であるから、各機器の最適回転数で運転するために歯車増速装置が用いられている。1980 年代にも直結式発電機という考えは多くの人が持っていたが、発電機が特注となるから実現される事は無かった。その後歯車の無い多極発電機を用いた直結式風車が開発され実用に供された。直結式風車は多極化のために大口径となり輸送や建設時に一部で問題が発生したが、インフラ整備が進み今日では大きな問題にはなっていない。

歯車式標準型発電機搭載型の風車と直結式風車のそれぞれの特質を考慮し欠点を解消しようと考えられている第 3, 第 4 のシステムが、低速一段増速式歯車に多極発電機を使う構造や、大きな歯車(親歯車)の周りに小型の発電機を配置する構造等も開発されて来た。本報告は一般的な風車の説明は簡単に述べ、動力伝達に関する問題のみを議論する。

2. 水平軸ロータ式風車の構造・分類

標準的な水平軸風車の構造を技術的な観点から分類したものを表 1 に示す。

本表から各項目は夫々独立で多くの選択肢がある。例えば一定速、直結式誘導発電機でピッチ制御とい

表 1 風車の分類と構造

項目	流体力学分類	風車運転速度	発電機	増速方式の有無	出力制御
技術	揚力型	一定速	誘導機	有(一般発電機採用)	ストール制御
	抗力形	可変速	同期機	無(直結式発電機採用)	ピッチ制御

ったものの製作も可能である。

3. 動力伝達システム別分類

風車主軸回転数は定格出力においても低く、標準型発電機の回転数の回転数に一致させるために歯車式増速装置が多く用いられてきた。一方、直結式の場合は歯車増速を行わないために発電機の極数を増やす事でこの問題に対応してきた。

3.1. 増速式風車

3.1.1. 主軸 2 軸受方式増速式風車

本構造は主軸を 2 つの軸受で支持する。ロータハットは主軸とフランジで、主軸と歯車は油圧嵌めで一体化され、歯車装置は主軸で支えられる。回転トルクは

図 0 主軸 2 軸受式増速式風車

セルからのトルクアームと称する弾性支持部により回転方向のみが拘束される構造である。図 1 に本構造を示す。

セル構造の経年変化や大きな風荷重によってはセルを変形させ、軸系に反力荷重が大きくなる可能性がある。また歯車車室の弾性支持部の剛性が増すと歯車内部の軸受に反力が発生するから 4 軸で支持する状況になる。この状態では軸系は不静定梁構造となる。

不静定構造は条件によっては大きな軸受荷重を発生する恐れがあるから、2 軸受から 4 軸受への遷移し特性変化に対する設計検討を変動荷重と軸受、歯車、歯車内軸受等に関して十分な事前検証が必要であるが非常に複雑な解析が必要になる。

風車の強度や制御に関する、検討は通常 IEC⁽¹⁾、ドイツ船級協会の設計ガイドライン⁽²⁾に沿って行われるがそれらには、一般的なパートレインへの規格・基準はあっても部品毎の規格や基準は無いから、各設計者が構造を十分理解して後述の歯車設計基準や軸受の基準を参照して基礎的な検討を行い、これに風車特有の運転条件における強度検討を行う必要がある。

3.1.2. 主軸 3 軸受方式増速式風車

本形式は前述の 2 軸受方式と基本的には変わらないが、主軸が一つの主軸受と歯車内部にある遊星歯車の軸受で支えられている。図 2 に示すように主

図 2 主軸 3 軸式増速式風車

軸受と歯車室内の 2 個の軸受、合計 3 個の軸受で支えられているから 3 軸受構造と呼ばれる。

主軸受には通常スフェリカル軸受と呼ばれる自由に回転が出来るような構造のものが使われており、曲げモーメントが発生しない構造である。主軸 2 軸受構造と同様の構造を持っている。しかしトルクアームは回転モーメントだけではなく軸直角の方向の反力も支えている。

増速歯車の出力軸はカップリングで発電機と繋がっており、風の変動が誘起する各方向の力は主軸受と

トルクアームで支持し、変形は高速軸カップリングの柔軟性で吸収する。単純な 3 軸受構造は基本的には不静定であるが、主軸受にスフェリカル軸受を用いる事で歯車室内軸受の不均衡反力は歯車で吸収されるから不静定は発生しない。しかしセルの剛性は低くて変形量が大きいと動きが拘束され反力が発生するか

図 3 1 段増速式風力発電装置

ら、セル変形を含めた総合的検討が必要である。この方式の風車は今日も広く使われている。

3.1.3. 1 段増速式風力発電装置

上述してきた歯車装置の故障事故の分析・原因から事故発生の多い高速軸部を無くすとともに、後述する直結式風車の欠点である発電機口径の減少を図るために 1 段式増速歯車と適切な大きさの発電機を組み合わせる 1 段増速型風車の開発も進んでいる。まだ実用に供している報告は無いが形状的には歯車と発電機の大きさが適度にバランスし最適な形状が得られる可能性がある。また発電機を歯車装置の中心軸に合わせる事が出来るからメンテナンスが取りやすい。本形状は今後の開発の目標となるものと思われる。図 3 に概念設計で発表された 1 段増速式風車の構想図を示す⁽³⁾。

発電機の回転数が標準型のそれにはならないから多極式発電機の開発が必要であるが、今日の技術を持ってすれば解決可能であろう。問題は量産化が出来なければ発電機のコストが高くコスト競争力が得られないことである。

3.1.4. 2 段増速多数発電機式風車

ロータッドが主軸を介して大歯車(親歯車)を駆動し、その大歯車の回りに小歯車を複数個配置し各小歯車で回転数で小型の発電機を駆動する方法のアイデアが米国で提案され、NREL(National Renewable Energy Laboratories)で試験が行われている。図 4 にその概念図を示す⁽⁴⁾。

この方式は、例えば 4,000kW の風力発電機の場合

図 4 2段増速多数発電機式風車

合 1,000kW の小型発電機を 4 個装備し、風の状況に応じて運転する発電機の数順番に増加させていく。本運転方法は、低出力時には必要台数の発電機を駆動するから総合的には効率が上がる。しかし運転状況により歯車の噛合い反力が変化するから、総合的な荷重条件が変わるし、発電機の投入遮断が頻繁に発生するからその制御方法を確立するのは容易ではない。

また、捻り振動的には多くの分岐を持つ系となるから不静定の振動系となる。本駆動システムは各方面からの十分な解析が行われれば興味深いアイデアである。今後の運転結果が待たれる。

3.1.5. 主軸式風車の構造

これまでに述べたような、歯車増速型風車を供給している各社の、大型機に対する取り組みで特筆すべきものは主軸の長さを限界まで短くしようとする取り組みである。

図 5 に代表的な形状を示すが⁵⁾、主軸部分の撓みの減少を図ったものである。3.1.1 で述べた 2 軸受方式の主軸で歯車室を支持すると発電機との連結部である高速軸までの距離が長くなり、歯車室のオーバーハングが大きくなって撓みが増加し、高速軸のミスマウント過大が懸念されるようになったから、その欠点を解消しようと考えられたものである。

3.2. 直結式風車の構造

発電機の極数を増加させて設計回転数を下げ、風車の翼・ロータットの回転数と一致させ増速装置を排除した風車である。直結方式においても多くの構造が考えられているから、順にその形式を示す。直結式風車の基本的な形状を図 6 に示す⁶⁾。

本風車のパートレインはロータットを主軸に取り付け、反対側に発電機を取り付けた基本的な形状である。直結式回転数が低くなるから発電機は多極式となり大直径となるから輸送等に考慮が必要である。

ロータットを発電機に直結させるから軸受数を減らす事が出来る。直結風車の課題は低回転速度で安定した、高品質電力を得る事であるが、現在は電力変換装置が進歩してきたために、ほとんどは解決されていると言えよう。

4. 動力伝達システムの現況と将来

大型の新しい世代の風車が運転されてから今日まで既に概ね 20 年間に過ぎた。その間には多くの運転成功例とともに多くの事故を経験してきた。パートレインは風車の心臓部であり信頼性の向上が第一の要求である。関係者の努力の結果、設計的な原因で事故発生に至るような問題は減少してきた。風車の大型化は今後も続くものと考え、更に

図 5 主軸式風車

信頼性を増し、既存の発電設備以上にエネルギーコストを下げる事が関係者に与えられた使命である。発電機大型化と重量の増加を防止する方法や歯車の設計製作の改善と信頼性の向上に向け、新しい風車の開発も進んでいる。

4.1. 主軸

翼が取り付けられているロータットの回転数は大型化が進んだ事かと最適性能速度比の選択から徐々に下がってきている。その為に主軸径が増加するから重量が増す。加えて翼長さが大きく荷重が増えるので系として顕現するためには軸受間距離を大きくするのが通常の見解である。しかしそうすると軸の重量が大きくなる。

4.2. 軸受

4.2.1. 現在の状況と今後の方向性

主軸と歯車内軸受を図 7 に示す。主軸受は、他の軸受、例えば歯車内の軸受と比較すると事故や故

障は少なかったが、大型化が進むと変動荷重も形状も大きくなるから精度確保や、保守・交換作業が

図 7 主軸と歯車内の軸受配置

難しくなってくる。

構造上の課題に加え、軸受径が増すことに比例して周速が増加するから、グリスの補給や高圧力接触面の潤滑管理等が難しくなる。従って軸受選択、軸受精度向上と潤滑特性、交換方法や潤滑油の漏洩対策といった点からの今まで以上の検討検証が必要である。

4.3. 歯車

4.3.1. 概要

一般的に歯車設計は既に多くの機器で実証された検討手法があり、その信頼性は高い。例えば、ISO6336の一連の設計基準⁷⁾や船舶用歯車の船級協会規則基準⁸⁾、機械学会式⁹⁾、等がある。風車用増速歯車は他の機器用と比較すると、多くの故障を発生させた。風車歯車の事故に関する報告では欧州の某歯車メーカーが供給した機器に多く事故が発生した事は風車の関係者では広く知られているところである。

4.3.2. 歯車式風車の今後

歯車式の風車はこれまでの開発結果や、前述の各項目を検討する事で今後も一定の大きさの風車で世界の主流になると思われる。直結式風車への移行の可能性があると言ったが、直結式風車においても、大型風車に直結式を採用すると、機器の直径が大きくなり、輸送や建設を考えると実現が難しい。その観点から対策として大形歯車の小型化や一段増速式程度で多極発電機

を使う構造が論じられている。しかし低速歯車の開発がここでも必要になる。大型歯車の設計・製造が確立すると飛躍的に増加する事が可能になると思われる。

5. 結言

本研究は、今日までの風車に於ける動力伝達システム(パワートレイン)の構造を検討し、今後の方向性を示した。今後は具体的な数値を基にパワートレインの設計における具体的な設計手法を報告していきたい。

- ① 各風車は各製造会社の歴史や技術的な背景により非常に異なっている。従って多くの構造があり実用に供されてきた。しかしながら一方で多くの事故や故障を発生させてきた。
- ② 歯車式風車の歯車事故が多く発生したために無歯車式風車が出現してきたのは前述の通りである。
- ③ しかしながら、大型直結式風車に於いても大型化にむけて考慮が必要な事は明らかである。
- ④ 風車の高性能化、大型化、信頼性の向上に向けて運転方法に連携した動力伝達システム(パワートレイン)を総合的に考慮し、製造するために今後も研究を進めて行く必要がある。

それが、今まで以上に風車を安定したエネルギー機器として世界の環境問題とエネルギー問題を解決する非常に重要な機器の1つとしての地位を確立し、環境問題やエネルギー問題に貢献出来ると考え

参考文献

- 1) IEC61400-1, 日本語版は JISC1400-1
- 2) GL Guideline for Wind turbine certificate
- 3) ProkonNord Energiesysteme GmbH カタログ
- 4) Clipper 社ホームページ
- 5) Vestas 社ホームページ
- 6) 三菱重工ホームページ
- 7) ISO6336 の関連規則, -1 は基礎資料, -2 は表面強度, -3 は曲げ強度, -5 は材料品質と強度
- 8) Rules and Regulations for the Classification of Ships, Main and Auxiliary Machinery General Requirements for the Design and Construction of Machinery や日本海事協会 鋼船規則検査要領等参照
- 9) 歯車強さの設計資料 日本機械学会