

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4311643号
(P4311643)

(45) 発行日 平成21年8月12日(2009.8.12)

(24) 登録日 平成21年5月22日(2009.5.22)

(51) Int.Cl. F I
HO2K 21/14 (2006.01) HO2K 21/14 G
HO2K 1/27 (2006.01) HO2K 1/27 501A

請求項の数 9 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2003-555654 (P2003-555654)	(73) 特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(86) (22) 出願日	平成14年12月19日(2002.12.19)	(73) 特許権者	501137636 東芝三菱電機産業システム株式会社 東京都港区三田三丁目13番16号
(86) 国際出願番号	PCT/JP2002/013309	(74) 代理人	100110423 弁理士 曾我 道治
(87) 国際公開番号	W02003/055045	(74) 代理人	100084010 弁理士 古川 秀利
(87) 国際公開日	平成15年7月3日(2003.7.3)	(74) 代理人	100094695 弁理士 鈴木 憲七
審査請求日	平成16年8月6日(2004.8.6)	(74) 代理人	100111648 弁理士 梶並 順
(31) 優先権主張番号	特願2001-387442 (P2001-387442)		
(32) 優先日	平成13年12月20日(2001.12.20)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		
前置審査			

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 永久磁石型回転電機の製造方法および風力発電用永久磁石同期発電機の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する永久磁石型回転電機の製造方法であって、

上記回転子の磁極の極対数を P、上記回転子の直径を D [m] とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数を N (機械角 360 度を 1 次とする) とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} [kW] とし、上記 D を $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上となるように設定し、上記回転子に発生する渦電流損の割合を評価するパラメータ X (単位は m) を

$$X = (N + P)^{1.5} N^{-4} P^2 D$$

と定義した場合に、上記 X の値が所定の値より小さくなるように、上記、P、D、N の値を選択し、2P 個の永久磁石を回転子に取り付けることを特徴とする永久磁石型回転電機の製造方法。

【請求項2】

永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する永久磁石型回転電機の製造方法であって、

上記回転子の磁極の極対数を P、上記回転子の直径を D [m] とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数を N (機械角 360 度を 1 次とする) とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} [kW] とし、上記 D を $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上となるように設定し、上記、P、D、N が

【数 1】

$$(N+P)^{1.5}N^{-4}P^2D < 0.6 \quad (\text{単位は m})$$

を満たす構成とした場合に、上記回転子の回転子ヨークを周方向に区分しないことを特徴とする永久磁石型回転電機の製造方法。

【請求項 3】

上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P < S$ の関係を満たす構成としたことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の永久磁石型回転電機の製造方法。

【請求項 4】

上記固定子のスロット数を S としたとき、
上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 2 : 3$ の関係を満たすとともに、
上記 P と上記 D とが、

10

【数 2】

$$P^{-0.5}D < 1.85 \quad (\text{単位は m})$$

の関係を満たす構成としたことを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれかに記載の永久磁石型回転電機の製造方法。

【請求項 5】

上記固定子のスロット数を S としたとき、
上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 8 : 9$ の関係を満たすとともに、
上記 P と上記 D とが、

20

【数 3】

$$P^{-0.5}D < 0.43 \quad (\text{単位は m})$$

の関係を満たす構成としたことを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれかに記載の永久磁石型回転電機の製造方法。

【請求項 6】

上記固定子のスロット数を S としたとき、
上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 10 : 12$ の関係を満たすとともに、
上記 P と上記 D とが、

30

【数 4】

$$P^{-0.5}D < 0.62 \quad (\text{単位は m})$$

の関係を満たす構成としたことを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれかに記載の永久磁石型回転電機の製造方法。

【請求項 7】

上記回転子の磁極を構成する上記永久磁石を軸方向に分割して区分構造としたことを特徴とする請求項 1 ないし 6 のいずれかに記載の永久磁石型回転電機の製造方法。

【請求項 8】

永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する風力発電用永久磁石型同期発電機の製造方法であって、

40

上記回転子の磁極の極対数を P 、上記回転子の直径を D [m] とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数を N (機械角 360 度を 1 次とする) とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} [kW] とし、上記 D を $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上となるように設定し、上記回転子に発生する渦電流損の割合を評価するパラメータ X (単位は m) を

$$X = (N + P)^{1.5} N^{-4} P^2 D$$

と定義した場合に、上記 X の値が所定の値より小さくなるように、上記、 P 、 D 、 N の値を選択し、 $2P$ 個の永久磁石を回転子に取り付けることを特徴とする風力発電用永久磁石

50

型同期発電機の製造方法。

【請求項 9】

永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する風力発電用永久磁石型同期発電機の製造方法であって、

上記回転子の磁極の極対数を P 、上記回転子の直径を D [m] とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数を N (機械角 360 度を 1 次とする) とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} [kW] とし、上記 D を $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上となるように設定し、上記、 P 、 D 、 N が

【数 5】

$$(N + P)^{1.5} N^{-4} P^2 D < 0.6 \quad (\text{単位は m})$$

10

を満たす構成とした場合に、上記回転子の回転子ヨークを周方向に区分しないことを特徴とする風力発電用永久磁石型同期発電機の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

この発明は、永久磁石型回転電機および風力発電用永久磁石型同期発電機に関し、特に、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線を磁極に巻き回された固定子とを具備した永久磁石型回転電機および風力発電用永久磁石型同期発電機に関する。

【0002】

20

【従来の技術】

従来より、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線を磁極に集中的に巻き回された固定子とを具備したいわゆる集中巻の永久磁石型回転電機が様々な用途に用いられている。集中巻は固定子の磁極に集中的に巻き回された構造であるがゆえに機械による自動巻きが可能であるため、サーボ用などの小型モータを中心に多く用いられている。このような小型モータでは銅損、鉄損、機械損が損失の中でほとんどを占めるため、回転子に発生する渦電流損は問題とならないことがほとんどである。

【0003】

一方、数 kW を超える大型機においては、これまでは、分布巻が用いられることが多かったが、コイルエンドの小さい集中巻の必要性が大型機においても高まりつつある。例えば、風力発電、特に、ギヤレス型の風力発電システムに永久磁石型同期発電機を採用する場合、分布巻と比較して、集中巻は、コイルエンドが小さいため軸方向の長さを低減でき、さらに電機子巻線に発生する銅損が小さいため高効率化が実現できるという点で、集中巻を選択した方がよいと言える。

30

【0004】

上記のように集中巻はコイルエンドの小ささや、さらに、自動巻きが可能であるといった利点を持っている反面、電機子電流の起磁力に起因する回転子の渦電流損が分布巻に比べて大きくなるという問題を抱えている。さらに近年、希土類磁石のような残留磁束密度と保磁力が高い高性能磁石が大容量機の回転子の磁極として積極的に利用されるようになってきているが、例えば、Nd-Fe-B系の磁石は導電率が高くフェライト系の磁石に比べて渦電流が流れやすいという特徴を持っている。

40

【0005】

以上のような理由から、集中巻の大容量機、特に、回転子の直径が 1 m を超えるような永久磁石型回転電機や風力発電用永久磁石型同期発電機では、回転子に発生する渦電流損が無視できないレベルに達することがあり、この渦電流損により回転機の効率が著しく下がったり、この渦電流損によって回転子の温度が上昇し、磁石の減磁を招くという課題があった。また、減磁には至らなくとも温度上昇によって残留磁束密度が低下し、その結果、磁石が発生する磁束が減少する。そのため、温度上昇のない状態と同じ出力を出すためには電機子電流を多く流す必要があり、銅損が増加し、効率が低下してしまうという課題もあった。

50

【 0 0 0 6 】

このような課題を解決する手法として、従来から回転子のヨークを積層鋼板で構成することにより、渦電流を低減する手法があった。また、特開 2 0 0 1 - 5 4 2 7 1 号公報には、回転子の鉄心を積層鋼板とせず、塊状ヨークで構成し、かつそのヨークを区分し、渦電流の経路を絶つことにより、渦電流を低減する手法が開示されている。

【 0 0 0 7 】

しかしながら、回転子のヨークを積層構造にすると、塊状ヨークで構成する場合に比べてコスト高になるという問題があり、また、上記特開 2 0 0 1 - 5 4 2 7 1 号公報のように塊状ヨークを区分すると以下のような様々な問題を生ずる。例えば、一体の塊状ヨークに比べて加工費が増えてコスト高になるという問題があり、さらに回転子のヨークに設けられた、絶縁部の厚さが各絶縁部においてバラツキが生じた場合に、モータの空隙部の磁束密度にもバラツキが生じ、結果的に電磁力の不均一につながり、騒音や振動につながるという懸念がある。また、ヨークを区分するために、電氣的に絶縁分割するための絶縁部があるが故に、その部分で起磁力が消費されるため、回転電機の出力低下につながるという問題がある。

【 0 0 0 8 】

【 発明が解決しようとする課題 】

上記のように、従来の永久磁石型回転電機や風力発電用永久磁石型同期発電機等においては、過電流を低減するために、回転子のヨークを積層構造にしたり、塊状ヨークを区分したりする構造が提案されてきたが、積層構造にすると加工費が増えてコスト高になるという問題点があり、また、塊状ヨークを区分すると、モータの空隙部の磁束密度にバラツキが生じ、結果的に電磁力の不均一につながってしまうという問題点があった。そのため、回転子のヨークは一体型であるのが望ましいと言える。

【 0 0 0 9 】

本発明は、かかる問題点を解決するためになされたものであり、回転子ヨークを一体型にした構造を保ちつつ、回転子の渦電流損を低減することができる永久磁石型回転電機および風力発電用永久磁石型同期発電機を得ることを目的としている。

【 0 0 1 0 】

【 課題を解決するための手段 】

この発明は、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する永久磁石型回転電機の製造方法および風力発電用永久磁石型同期発電機の製造方法であって、上記回転子の磁極の極対数を P 、上記回転子の直径を D [m] とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数を N (機械角 3 6 0 度を 1 次とする) とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} [kW] とし、上記 D を $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上となるように設定し、上記回転子に発生する渦電流損の割合を評価するパラメータ X (単位は m) を

$$X = (N + P)^{1.5} N^{-4} P^2 D$$

と定義した場合に、上記 X の値が所定の値より小さくなるように、上記、 P 、 D 、 N の値を選択し、 $2P$ 個の永久磁石を回転子に取り付ける永久磁石型回転電機の製造方法および風力発電用永久磁石型同期発電機の製造方法である。

【 0 0 1 1 】

また、この発明は、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する永久磁石型回転電機の製造方法および風力発電用永久磁石型同期発電機の製造方法であって、上記回転子の磁極の極対数を P 、上記回転子の直径を D [m] とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数を N (機械角 3 6 0 度を 1 次とする) とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} [kW] とし、上記 D を $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上となるように設定し、上記、 P 、 D 、 N が

【 0 0 1 2 】

【 数 6 】

10

20

30

40

50

$$(N+P)^{1.5}N^{-4}P^2D < 0.6 \text{ (単位は m)}$$

【 0 0 1 3 】

を満たす構成とした場合に、上記回転子の回転子ヨークを周方向に区分しない永久磁石型回転電機の製造方法および風力発電用永久磁石型同期発電機の製造方法である。

【 0 0 1 4 】

また、上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P < S$ の関係
10
を満たす構成とする。

【 0 0 1 5 】

また、上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 2 :$
3 の関係を満たすとともに、上記 P と上記 D とが、

【 0 0 1 6 】

【 数 7 】

$$P^{-0.5}D < 1.85 \text{ (単位は m)}$$

20

【 0 0 1 7 】

の関係を満たす構成とする。

【 0 0 1 8 】

また、上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 8 :$
9 の関係を満たすとともに、上記 P と上記 D とが、

【 0 0 1 9 】

【 数 8 】

30

$$P^{-0.5}D < 0.43 \text{ (単位は m)}$$

【 0 0 2 0 】

の関係を満たす構成とする。

【 0 0 2 1 】

また、上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 10 :$
12 の関係を満たすとともに、上記 P と上記 D とが、

【 0 0 2 2 】

【 数 9 】

40

$$P^{-0.5}D < 0.62 \text{ (単位は m)}$$

【 0 0 2 3 】

の関係を満たす構成とする。

【 0 0 2 4 】

また、上記回転子の磁極を構成する上記永久磁石を軸方向に分割して区分構造とする。

【 0 0 2 5 】

50

【発明の実施の形態】

実施の形態 1 .

図 1 に、本発明の実施の形態 1 の例を示す。図 1 はインナーロータ型の永久磁石型同期発電機である。すなわち、図 1 においては、回転子 100 の外側に固定子 101 が位置している。図 1 において、1 は固定子 101 を構成している固定子鉄心、2 は固定子鉄心 1 に設けられた複数個のティース、3 は隣接するティース 2 間に形成された凹部であるスロット、4 は回転子 100 に設けられた複数の永久磁石、5 は永久磁石 4 が等間隔に取り付けられている一体型の塊状の回転子ヨーク、6 は回転子 100 の回転軸である。

【0026】

図 1 に示すように、回転子外径は 3 m であり、回転子 100 に設けられた永久磁石 4 の個数（すなわち、回転子磁極の極数）は 64、固定子 101 のティース 2 およびスロット 3 の個数は共に 96 である。回転子 100 の塊状のヨーク 5 の表面に永久磁石 4 が配置された表面磁石型の同期発電機であり、固定子 101 は 96 個のティース 2 を有し、図 1 においては図示は省略しているが、各ティース 2 に電機子巻線が集中的に巻き回されたいわゆる集中巻の巻線方式を採用している。

【0027】

図 2 (a) は、図 1 の固定子 101 と回転子 100 の一部を模式的に示したものであり、図 2 (b) , (c) , (d) は、電機子電流が形成する起磁力波形を示したものである。図 2 において、8 はティース 2 に巻き回された電機子巻線である。他の構成については、図 1 に示したものに相当するため、同一符号を付して示し、ここではその説明を省略する。本実施の形態では、回転子 100 の極数と固定子 101 のスロット数の比が 2 : 3 であるため、電磁的に 2 極 3 スロット分が 1 つのユニットとなっている。したがって、2 極 3 スロットについて考えればよい。固定子 101 には、図 2 (a) に示すように、U 相、V 相、W 相の合計 3 相の電機子巻線 8 がスロット 3 に納められており、これらの電機子巻線 8 は各ティース 2 に集中的に巻き回されている。また、3 相の電機子巻線 8 には、電気角 120 度ずつずれた正弦波状の電流が通電される。このように電機子巻線 8 に電流が流れると、空隙部に矩形波状の起磁力が発生する。例えば、U 相に 1 の電流が流れているとき、V 相、W 相には - 1 / 2 の電流が流れていることになる。このとき、空隙部に発生する起磁力波形は図 2 (b) のようになる。実際は、3 相の電流は時間とともに正弦波状に変化するため、この起磁力波形も変化する。この起磁力波形を時間、空間でフーリエ級数展開すると、回転子 100 と同期した起磁力成分と、非同期成分とがあることが分かる。

【0028】

図 3 に、起磁力のフーリエ級数展開した結果を示す。図 3 は、極数 2 P とスロット数 S との比が 2 P : S = 2 : 3 のときの固定子の起磁力のフーリエ解析結果を示したものである。横軸は 2 極（電気角 360 度）を基本波とした空間次数でありその符号が正のときは正相を示し、回転子 100 と同じ方向に回転する起磁力である。負は逆相を示し、回転子 100 の回転方向と逆方向に回転する起磁力である。縦軸はその成分の起磁力の振幅を表し、回転子と同期した成分すなわち + 1 次の大きさを 1 として規格化して示している。ただし、すべての調波成分について示したのではなく、15 次以上の成分は省略している。この起磁力の各成分の中で、回転子 100 の磁極と同期した成分は横軸が + 1 次の成分で、この成分によってトルクが得られる。また、この起磁力成分は回転子 100 に固定した座標系から見ると時間的に変化しない起磁力であるため、回転子 100 の渦電流の発生原因とならない。ところが、それ以外の成分は非同期成分であり、回転子 100 に固定した座標系から見ると時間的に変化するので、回転子 100 の渦電流の原因となっている。また、これら非同期成分の中では - 2 次の成分の振幅が最も大きい。図 2 (c) , (d) に、同期成分（基本波の正相成分）と非同期成分の例として逆相の 2 次成分を示す。既に説明したように、この同期成分は渦電流の原因とならないが、非同期成分は回転子 100 に渦電流を発生させる。特に、このように極数とスロット数の比が 2 : 3 の場合には、逆相成分の中で 2 次成分の振幅が最も大きいため、回転子 100 に発生する渦電流損の主な原因といえる。本実施の形態にて扱っている発電機の極数は 64 極なので、この渦電流の

10

20

30

40

50

主な原因となっている起磁力波形の空間次数は機械角 360 度を 1 次とすれば 64 次となる。

【0029】

次に、上記非同期成分によって発生する回転子 100 の渦電流を把握するために、簡易的なモデルを用いて近似的に導出することにする。さらに、その渦電流は原因になっている起磁力の非同期成分の次数 N と、回転子 100 の極対数 P と、回転子 100 の外径 D [m] とは、どのような関係にあるのか、また、渦電流を低減するために上記 N, P をどのように選定すればよいかについて考えることにする。

【0030】

図 4 の上段は、渦電流の原因となる起磁力の非同期成分によって発生する磁束の時間的变化を示したものである。また、図 4 の下段は上記磁束の変化によって回転子 100 に生じる渦電流の経路と渦電流損を求める際に用いる微小回路（斜線部）を示したものであり、回転子 100 を空隙面から見下ろした様子を簡略化して示している。なお、図 4 において、w [m] は、渦電流の原因となる起磁力の 1 周期分の長さ、すなわち、波長であり、L [m] は、発電機のコア長である。また、x は周方向の位置を表す座標 [m] で、y は軸方向の位置を表す座標 [m] である。渦電流の流れる経路は、図 4 に示す通り、起磁力の半波長分の幅すなわち w / 2 の幅の範囲内で形成される。そこで、w / 2 の範囲内に図の斜線部に示すような周方向の幅 2x、軸方向の幅 2y での位置に微小回路を考え、この微小回路の抵抗と回路に加わる起電力から渦電流損を求め、さらに空間的に積分することによって発電機全体に発生する渦電流損を算出する。

【0031】

まず、微小回路の抵抗 r [] を求める。抵抗 r は抵抗率 [m] と回路の長さに比例し、回路の断面積に反比例するので、

【0032】

【数 10】

$$r = \rho \left(\frac{4y}{\delta dx} + \frac{4x}{\delta dy} \right) \dots\dots(1)$$

【0033】

と表される。ただし、ここで δ は渦電流の表皮深さであり単位は m である。図 4 から幾何学的に

【0034】

【数 11】

$$y = \frac{L}{w} x, \quad dy = \frac{L}{w} dx \dots\dots(2)$$

【0035】

が成り立つ。これを式 (1) に代入すると、

【0036】

【数 12】

$$r = \frac{4\rho}{\delta} \frac{L^2 + w^2}{wL} \frac{x}{dx} \dots\dots(3)$$

【0037】

となる。

【 0 0 3 8 】

次に、この微小回路に掛かる起電力を求める。渦電流の原因となる磁束密度の非同期成分の時間的、空間的变化を

【 0 0 3 9 】

【 数 1 3 】

$$B(x,t) = B \sin\left(\frac{2\pi}{w}x - \omega t\right) \cdots \cdots (4)$$

10

【 0 0 4 0 】

として表す。これは磁束密度の変化の空間的周波数は $2\pi/w$ であり、その周波数は [rad/sec] であることを示している。微小回路に掛かる起電力は区間 $[-x, x]$ の鎖交磁束の時間微分で表されるので、

【 0 0 4 1 】

【 数 1 4 】

$$e = -\frac{d}{dt} \int_{-x}^x B(\xi,t) 2y d\xi \cdots \cdots (5)$$

20

【 0 0 4 2 】

となる。式 (4) を式 (5) に代入すると、

【 0 0 4 3 】

【 数 1 5 】

$$e = \frac{2\omega BL}{\pi} x \sin\left(\frac{2\pi}{w}x\right) \cos\omega t \cdots \cdots (6)$$

30

を得る。このように起電力は時間的に正弦波状に変化するのでその実効値 E は

【 0 0 4 4 】

【 数 1 6 】

$$E = \frac{\sqrt{2}\omega BL}{\pi} x \sin\left(\frac{2\pi}{w}x\right) \cdots \cdots (7)$$

【 0 0 4 5 】

となる。微小回路のリアクタンスを無視すれば、微小回路に発生する渦電流損 dQ [W] は式 (3) , (7) から

【 0 0 4 6 】

【 数 1 7 】

$$dQ = \frac{E^2}{r} = \frac{\omega^2 B^2 \delta}{2\pi^2 \rho} \frac{wL^3}{L^2 + w^2} x \sin^2\left(\frac{2\pi}{w}x\right) \cdots \cdots (8)$$

40

【 0 0 4 7 】

50

と求めることができる。この微小回路の渦電流損を区間 $[-w/4, w/4]$ で積分し、さらに渦電流の流れる経路は起磁力の半波長分の幅で形成されていたので、 $2N (= 2D/w)$ 倍しないとイケないので、回転子全体での渦電流損 $Q [W]$ は、

【 0 0 4 8 】

【 数 1 8 】

$$\begin{aligned}
 Q &= 2N \int dQ \\
 &= \frac{2\pi D}{w} \int_0^{w/4} \frac{\omega^2 B^2 \delta}{2\pi^2 \rho} \frac{wL^3}{L^2 + w^2} x \sin^2\left(\frac{2\pi}{w}x\right) dx \\
 &= \left(\frac{1}{64\pi} + \frac{1}{16\pi^3}\right) \frac{D\omega^2 B^2 \delta}{\rho} \frac{L^3 w^2}{L^2 + w^2} \dots\dots\dots(9)
 \end{aligned}$$

10

【 0 0 4 9 】

となる。さらに、表皮深さ δ については、抵抗率 ρ 、透磁率 μ 、周波数 ω とすると、

【 0 0 5 0 】

【 数 1 9 】

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \dots\dots\dots(10)$$

20

【 0 0 5 1 】

となる。ここで、通常発電機では $w \ll L$ であるので、

【 0 0 5 2 】

【 数 2 0 】

$$\frac{L^3 w^2}{L^2 + w^2} \approx L w^2$$

30

【 0 0 5 3 】

と近似できる。また、 $w = D/N$ であるから、式 (9) (10) から

【 0 0 5 4 】

【 数 2 1 】

$$Q \approx K \omega^{1.5} N^{-2} B^2 D^3 L \dots\dots\dots(11)$$

40

【 0 0 5 5 】

と近似できる。ただし K は

【 0 0 5 6 】

【 数 2 2 】

$$K = \left(\frac{\pi}{64} + \frac{1}{16\pi^2} \right) \sqrt{\frac{2}{\mu\rho}} \dots (12)$$

【 0 0 5 7 】

である。また、空間次数 N の非同期の起磁力によって発生する渦電流の角周波数 [r a d / s e c] は発電機の回転数 ω_m [r a d / s e c] を用いると

【 0 0 5 8 】

【 数 2 3 】

10

$$\omega = (N \pm P)\omega_m \dots (13)$$

【 0 0 5 9 】

と表される。ただし、式中の符号 + は空間次数 N の起磁力が逆相のとき、- は正相のときに対応する。すなわち、回転子に固定した座標系から見ると、回転子と逆方向に進行する起磁力の周波数は高く、逆に回転子と同じ方向に進行する起磁力の周波数は低く見えるのである。したがって、 Q は、式 (1 1) (1 3) より

20

【 0 0 6 0 】

【 数 2 4 】

$$Q = K\omega_m^{1.5}(N \pm P)^{1.5}N^{-2}B^2D^3L \dots (14)$$

【 0 0 6 1 】

と書くことができる。

30

【 0 0 6 2 】

図 5 ~ 8 に集中巻にて良く用いられる様々な極数とスロット数の比に対して、起磁力の成分がどのようになっているかを示す。図 5 は、極数 $2P$ とスロット数 S との比が $2P : S = 4 : 3$ のときの固定子の起磁力のフーリエ解析結果を示したものであり、図 6 は、極数 $2P$ とスロット数 S との比が $2P : S = 10 : 9$ のときの固定子の起磁力のフーリエ解析結果を示したものであり、図 7 は、極数 $2P$ とスロット数 S との比が $2P : S = 8 : 9$ のときの固定子の起磁力のフーリエ解析結果を示したものであり、図 8 は、極数 $2P$ とスロット数 S との比が $2P : S = 10 : 12$ のときの固定子の起磁力のフーリエ解析結果を示したものである。

【 0 0 6 3 】

40

分布巻の場合には、毎極毎相 1 や 2 の場合、起磁力の非同期成分は正相 5 次、逆相 7 次成分あるいはそれ以上であり、基本波より高次の成分である。しかしながら、集中巻の場合、基本波より高次の成分であっても分布巻に比べると基本波に近い次数に存在し、場合によっては基本波よりも低い成分にも非同期成分が存在することが分かる。さらに、渦電流の主たる原因になっている非同期成分の起磁力の空間次数を N (機械角 360 度を 1 次) とすればその大きさは極対数との比すなわち P/N に比例する。さらに、図 3、図 5 ~ 8 から渦電流損の主たる原因となる起磁力すなわち非同期成分でもっとも振幅が大きいものは逆相であることも分かっている。したがって、式 (1 4) は次のように書きかえることができる。

【 0 0 6 4 】

50

【数 2 5】

$$Q = K_1 \omega_m^{1.5} (N+P)^{1.5} N^{-4} P^2 D^5 L \dots (15)$$

【0065】

ただし、ここで K_1 は比例定数である。以上により、回転子に発生する渦電流損の近似式を導出できた。この式は永久磁石型の発電機あるいはモータにおいて、回転子に発生する渦電流損が極対数 P と回転子外径 D と逆相起磁力の空間次数 N に大きく依存していることを示している。

10

【0066】

一方、一般的に回転電機において回転子の外径 D と軸長 L と回転数 ω_m と出力 P_{out} との間には、おおよそ

【0067】

【数 2 6】

$$P_{out} = K_2 \omega_m D^2 L \dots (16)$$

20

【0068】

なる関係があることが知られている。ただし、 K_2 は比例定数である。したがって、式(15)を式(16)で除することにより、出力に対する渦電流損の割合を求めることができる。

【0069】

【数 2 7】

$$\frac{Q}{P_{out}} = \frac{K_1}{K_2} \omega_m^{0.5} (N+P)^{1.5} N^{-4} P^2 D \dots (17)$$

30

【0070】

式(17)中から発電機の構造によって決まる要素すなわち、極対数 P 、起磁力高調波の空間次数 N 、回転子外径 D を取り出し、これを発電機あるいはモータの回転子に発生する渦電流損の割合を評価するパラメータとして X (単位は m) を

【0071】

【数 2 8】

$$X = (N+P)^{1.5} N^{-4} P^2 D \dots (18)$$

40

【0072】

のように定義する。 X はもちろん厳密な意味で割合を示すものではないが、種々の発電機あるいはモータにおいて X を算出しその大きさを知ることにより、渦電流損の大小を判断する目安になると考えられる。

【0073】

ギヤレス型の風力発電機など低速で回転子が回転し、大きなトルクを必要とする発電機

50

では式(16)からわかるように、軸長 L を大きくするより直径 D を大きくするほうが有利である。また、軸長 L と直径 D の比について考えると、 L が大きくなると軸受けのスペンが大きくなるため、剛性を補う必要が生じ、発電機の重量が増大する。また、風力発電においては軸受けが発電機の片側にのみ設けた構成になることがあるが、 L が大きくなると機械剛性が低下し、この構成が実現不可能となる。さらに、熱設計の観点から L が大きくなるとダクトを設けなければ冷却できなくなる。ダクトを設けると L がさらに大きくなるため重量も大きくなるという課題がある。上記を鑑みて検討した結果、 $L = D$ であることが望ましく、より好ましくは $L = 0.8D$ 、さらにより好ましくは $L = 0.5D$ であることがわかった。

【0074】

図16に発電機の出力 P_{out} に対する D を $L = D$ 、 $L = 0.8D$ 、 $L = 0.5D$ とした場合について示す。出力が大きくなるにつれて、 D を大きくする必要があることが分かる。また、風力発電用としては、先に述べた機械剛性や熱設計の観点からは $L = D$ とした場合の曲線より上の領域に設計されることが望ましく、さらには $L = 0.8D$ とした場合より上の領域であることが望ましく、さらには $L = 0.5D$ とした場合より上の領域であることがより望ましい。したがって、図16から、出力が2000kWの場合、 $D = 2.2$ [m]、より好ましくは $D = 2.3$ [m]、さらにより好ましくは $D = 2.7$ [m]として設計されるのが望ましいことがわかる。出力が500kWの場合、 $D = 1.4$ [m]、より好ましくは $D = 1.5$ [m]、さらにより好ましくは $D = 1.8$ [m]であればよく。また、出力が100kWでは $D = 0.7$ [m]、より好ましくは $D = 0.8$ [m]、さらにより好ましくは $D = 0.9$ [m]とすればよいことが分かる。500kW以上の領域を直線近似すると、 $L = D$ のときは $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 、 $L = 0.8D$ のときは $D = 0.00048 P_{out} + 1.3$ 、 $L = 0.5D$ のときは $D = 0.00057 P_{out} + 1.5$ と表される(この式で P_{out} の単位はkW、 D の単位はm)。したがって、この直線より D が大きい領域に設計されることが望ましい。

【0075】

直線近似した場合、出力が小さい範囲では実際の曲線から外れることになる。しかし、発電機やモータの各容量のシリーズ化を考えたときには生産設備等の制限から外径はほぼ同じで、軸長で調整することが多い。したがって、ここでは出力が低い範囲においても外径が急に小さくならないよう直線近似を採用した。以上により、出力が小さくても極端に外径が小さくならないことがないため、同じ生産設備でも出力の小さい発電機を製造できるという効果がある。

【0076】

ギヤレス型の風力発電用などでは100kWを超えるような大容量の場合、回転子外径 D と軸長 L の関係あるいは D の値を上記のように設計しておけば、トルクが大きくなりギヤレス型に適した設計となる他、薄型となることでダクトを設けなくとも冷却性能を確保できる等、熱設計も有利となるという効果があり、軸受けのスペンが短くなることで機械剛性を確保でき、片側にのみ軸受けを設けた構成も可能となるという効果もある。

【0077】

一方、 X を見ると、外径が大きい回転電機、特に回転子外径が1mを超えるような風力発電機を設計するにあたっては、 P 、 N を適切に選ばなければ回転子に発生する渦電流が無視できなくなると言える。

【0078】

このパラメータの妥当性を検証するために、図9に示すような6種の仕様で、6通りの発電機を設計し、電磁界解析によって定格運転時に回転子に発生する渦電流損を求めた。図9の最右欄に、各仕様における定格出力に対する渦電流損の割合の解析結果を示す。さらに、横軸に X をとり縦軸に渦電流損の出力に対する割合をとったグラフを図10に示す。渦電流損の出力に対する割合とパラメータ X の間には相関関係があることが分かる。

【0079】

次に、回転子の渦電流損を小さくし、高効率な発電機あるいはモータを設計する際に X

10

20

30

40

50

をどのように選定すべきか考える。発電機あるいはモータの効率を95%以上に設計しようとするれば、固定子で発生する銅損と鉄損や機械損そして回転子の渦電流損を含む漂遊負荷損の合計を5%以内に設計する必要がある。機械損は銅損や鉄損に比べて一般的に小さいのであまり考慮しなくてもよい。銅損や鉄損は固定子の寸法、形状等である程度低減できるものの限界がある。そこで、総損失5%の半分すなわち2.5%まで回転子の渦電流損を低減できる構造にすれば、銅損や鉄損などの損失を合計した総損失を5%程度に抑えることができると考える。つまり、回転子の渦電流損を定格出力の2.5%程度に抑えることができれば、効率95%の高効率を達成できると考える。図10のグラフにおいて渦電流損の割合を2.5%以下にするには、Xの値を0.6[m]以下にしなければならないことから、

【0080】

【数29】

$$(N+P)^5 N^{-4} P^2 D < 0.6 \dots (19)$$

【0081】

とすれば高効率な永久磁石型発電機あるいはモータを実現できると考えられる。図1の発電機は磁界解析の結果、回転子の渦電流損は定格出力の僅か0.6%であった。この発電機では $X = 0.17$ [m]であり、当然のことながら式(19)をみたす。

【0082】

以上より、式(19)を満たす構造にすることにより、永久磁石型回転電機が大型化しても、回転子の渦電流の原因となる特定の電機子起磁力の空間次数Nを大きくすることができ、回転子に発生する渦電流を低減することが可能となる。その結果、回転子の発熱を抑制できるという効果があると同時に、回転電機の高効率化を図ることができるという効果もある。さらに、従来例に述べられているように回転子のヨークを区分したり、絶縁分割したりといった複雑でコストのかかる構造にしくとも、本実施の形態においては、塊状の回転子ヨークを用いながら、回転子の渦電流損を低減することができるという効果がある。また、ここでは回転子の表面に磁石を備えた表面磁石型の回転電機について述べたが、回転子鉄心に磁石を埋め込んだ埋め込み磁石型についても電機子起磁力の非同期成分が磁石等の渦電流損の原因になっている点では共通である。したがって、埋め込み磁石型の回転電機についても本実施の形態の構成にすることによって同様の効果が得られることは言うまでもない。

【0083】

また、本実施の形態においては、インナーロータ型について述べたが、回転子が固定子の外側を回転する、アウトロータ型でも同じ効果が得られることがいうまでもない。さらに、本実施の形態で述べたラジアルギャップ型だけではなく、固定子と回転子が回転軸に垂直な面に対向するアキシアルギャップ型でも、回転軸から回転子磁極までの距離を回転子の半径と定義しその2倍の値を直径Dとして定義すれば同じ効果が得られることはいうまでもない。

【0084】

実施の形態2.

本実施の形態においては、実施の形態1で示した永久磁石型回転電機と同様に、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線を磁極に巻き回された固定子とを備えた風力発電用永久磁石型同期発電機に対して、上記実施の形態1で示した式(19)を満たす構成を適用した例について説明する。図11及び図12に風力発電システムの概念図を示す。これらの図において、10は風力発電システムの支柱となるタワーであり、11はタワー10上に設けられたナセルである。ナセル11の内部には、図11の例では、発電機12と増速ギヤ13とが設けられており、図12の例では、発電機12のみが設けられ

10

20

30

40

50

ている。14はナセル11の先端に設けられた風車であり、15及び16は、それぞれ、風車14を構成しているハブとブレードである。なお、回転子および固定子の構造については、上述の実施の形態1で示した図1のものと同様であるため、ここでは説明を省略する。

【0085】

このように、図11の例においては、タワー10の上にナセル11があり、ナセル11内部に発電機12と増速ギヤ13が納められており、その先に風車14が接続されている。ハブ15とブレード16で構成される風車14と発電機12とは増速ギヤ13を介して接続されている。このシステムでは、増速ギヤ13を介することで、発電機12の回転数を風車14の回転数より高くしているため、発電機12のトルクが小さくてすみ、発電機12は小型化が可能であるという利点がある。しかしながら、増速ギヤ13の発生する騒音や増速ギヤ13のメンテナンスなどの課題がある。一方、近年、図12に示すように、風車14と発電機12が直結されたいわゆるギヤレス型の風力発電システムが普及しつつある。当該ギヤレス型のもは、さらに、巻線界磁型の同期発電機に比べて、界磁損失がないという点で永久磁石型同期発電機が有利となる。

【0086】

このシステムでは増速ギヤに起因する騒音やメンテナンスの課題はないが、発電機のトルクがギヤレス型に比べて大きくなるため、発電機自体の体格が大きくなる。これまで説明してきたように、式(18)によれば、発電機の回転子外径Dが大きくなると回転子の渦電流損が大きくなる。したがって、極数Pとスロット数Sの選定が適切でないと、渦電流損が大きくなってしまい、界磁損失がないという永久磁石型同期発電機の利点を生かすきれないことになる。

【0087】

したがって、風力発電用永久磁石型同期発電機、特にギヤレス型風力発電システムに組みこまれるような回転子径が大きな永久磁石型同期発電機においては、式(19)をみたく構造にすることにより、回転子の渦電流損を低減でき、回転子の発熱を抑制できると同時に、発電機の高効率化が図れるため、風力という自然エネルギーの有効利用ができるという効果がある。

【0088】

実施の形態3.

これまで述べてきたように、固定子が集中巻の大型の永久磁石型発電機やモータにおいては、極対数Pと渦電流の原因となる起磁力の空間次数Nを適切に選ばないと回転子の渦電流損が非常に大きくなることがある。換言すれば、極対数Pとスロット数Sを適切に選定しないと渦電流による発熱や、効率低下が懸念される。一方、集中巻の回転電機の極数2Pとスロット数Sには様々な組み合わせが考えられる。良く用いられる組み合わせとして、 $2P:S=4:3$ 、 $10:9$ 、 $8:9$ 、 $10:12$ 、 $2:3$ となる組み合わせなどある。ここでは、これら5通りの組み合わせについて極数が60極程度になるように、64極48スロット、60極54スロット、64極72スロット、60極72スロット、64極96スロットとして、回転子外径3mの同一出力の永久磁石型同期発電機を設計することを考えた。なお、ここでは回転子に発生する渦電流損の比較を行うため、条件を同じにするため回転数は同一としている。また、スロット開口部のパーミアンスの変化の影響が大きくなるように、スロット開口幅もほぼ同じ設計としている。これら5種類の発電機について電磁界解析により定格運転時に回転子に発生する渦電流損を求めた。図13にそれぞれの渦電流損の出力に対する割合を示す。この結果から、極数2Pをほぼ同じに設計しても、極数とスロット数の組み合わせによって渦電流損が大きく違うことが分かる。さらに、横軸にスロット数と極数の比 $S/2P$ を横軸にとってグラフにしたものを図14に示す。この結果から、 $S/2P > 1$ すなわち $2P < S$ の場合には渦電流損が小さく、逆に $S/2P < 1$ すなわち $2P > S$ のときには渦電流損が大きいことが分かる。

【0089】

この原因を考察してみる。図3と図5～8から、渦電流の主たる原因になっている起磁

力の非同期成分の空間次数 N を見ると、 $2P : S = 4 : 3$, $10 : 9$ すなわち $2P > S$ となる組み合わせでは同期成分よりも次数の低いところに同期成分と同等あるいはそれ以上の振幅の非同期に起磁力成分が存在する。具体的には $2P : S = 4 : 3$ のときには $-1/2$ 次で振幅は同期成分の 2 倍、 $2P : S = 10 : 9$ のときには $-4/5$ 次で振幅は同期成分の 1.25 倍の起磁力が存在する。ところが、 $2P : S = 8 : 9$, $10 : 12$, $2 : 3$ すなわち $2P < S$ となる組み合わせでは同期成分よりも次数の低いところに振幅の大きな非同期の起磁力成分が存在しない。ここでは、極対数は 30 か 32 でほぼ一定、回転子外径 D も一定であるから、回転子の渦電流損の大きさは式 (18) より起磁力の空間次数 N に依存する。したがって、大型の集中巻の永久磁石型回転電機を設計する場合には $2P < S$ とした方が、 N を小さく設計できるので渦電流損は小さくなると言える。もちろん、 $2P > S$ とした場合でも極数を増やして式 (19) をみたく構造とすると、渦電流損は低減できる。しかしながら、 $2P < S$ とした場合に比べて、パラメータ X の値を同じに設計しようとする極数が増えるため加工費が上がり不利である。

10

【0090】

以上より、大形の永久磁石型回転電機においては、 $2P < S$ をみたく構造にすることにより、回転子の渦電流損を低減でき回転子の発熱を抑制できるのと同時に、発電機の高効率化が図れるという効果がある。さらに、渦電流損を低減する構成とした場合、 $2P < S$ とした場合に比べて、極数が少なくなるため加工費が少なく低コストの永久磁石型回転電機を提供できるという効果がある。

【0091】

20

特に、同じかほぼ同じ極数で集中巻の回転電機を設計した場合に $2P : S = 2 : 3$ のときには他に比べて N は最も大きくなるため極数をもっとも少なく構成できるため非常に有利である。図 3 から $2P : S = 2 : 3$ のとき渦電流の主たる原因となるのは 2 次の逆相の起磁力であるから、 $2P$ 極の場合は $N = 2P$ となる。これを式 (19) に代入すると、

【0092】

【数30】

$$P^{-0.5}D < 1.85 \dots (20)$$

30

【0093】

を得る。

【0094】

したがって、集中巻で極対数 P とスロット数 S の組み合わせが $2P : S = 2 : 3$ なる永久磁石型回転電機において式 (20) をみたくような構成にしたことにより、渦電流の原因となる電機子起磁力の特定の調波成分の空間次数 N を大きくするのに、特に少ない極数で実現可能なので、回転子の渦電流損を低減できるという効果があるとともに磁極の加工費を特に少なくできるという効果がある。

40

【0095】

一方、 $2P < S$ をみたく集中巻の永久磁石型回転電機において $2P : S = 8 : 9$, $10 : 12$ なる関係が成り立つ場合についても同様に考える。 $2P : S = 8 : 9$ の場合には、図 7 より $5/4$ 次の逆相起磁力が渦電流の主な原因となっているから $N = 5P/4$ を式 (19) に代入して、

【0096】

【数31】

$$P^{-0.5}D < 0.43 \dots (21)$$

【 0 0 9 7 】

を得る。したがって、 $2P : S = 8 : 9$ の場合には式(21)をみたす構成とすることにより、回転子に発生する渦電流を低減し、回転子の発熱を抑制できるとともに、高効率な永久磁石型回転電機を提供できるという効果がある。また、 $2P : S = 10 : 12$ の場合には、図8より7/5次の逆相起磁力が渦電流の主な原因となっており、 $N = 7P/5$ を式(19)に代入して、

10

【 0 0 9 8 】

【 数 3 2 】

$$P^{-0.5}D < 0.62 \dots (22)$$

【 0 0 9 9 】

を得る。したがって、 $2P : S = 10 : 12$ の場合には式(22)をみたす構成とすることにより、回転子に発生する渦電流を低減し、回転子の発熱を抑制できるとともに、高効率な永久磁石型回転電機を提供できるという効果がある。

20

【 0 1 0 0 】

また、 $2P : S = 8 : 9$ 、 $2P : S = 10 : 12$ の組み合わせの集中巻の永久磁石型回転電機は巻線係数が $2P : S = 4 : 3$ 、 $2 : 3$ の0.866に比べて高くそれぞれ0.945、0.933である。このため磁石の使用量を小さくでき低コストな回転電機を提供できるという効果がある。また、同じまたはほぼ同じ極数で回転電機を設計した場合には、極数とスロット数の最小公倍数が $2P : S = 4 : 3$ 、 $2 : 3$ の場合にくらべて大きくなる。例えば、64極48スロット($2P : S = 4 : 3$)、64極96スロット($2P : S = 2 : 3$)の場合にはともに192であるのに対し、64極72スロット($2P : S = 8 : 9$)では576、60極72スロット($2P : S = 10 : 12$)では360となる。一般には、最小公倍数が大きいほどコギングトルクが小さい。したがって、 $2P : S = 8 : 9$ 、 $10 : 12$ にすることにより、コギングトルクの小さな永久磁石型回転電機を得ることができる。特に風力発電用の永久磁石型同期発電機においては、コギングトルクが大きいと風車の起動に必要な風速が大きくなり不利になる。したがって、 $2P : S = 8 : 9$ 、 $10 : 12$ にすることによりコギングトルクが小さくなり、結果として風速が小さくとも風車が起動し発電を開始することができるという効果がある。

30

【 0 1 0 1 】

以上より、集中巻で極対数 P とスロット数 S の組み合わせが $2P : S = 8 : 9$ あるいは $10 : 12$ なる永久磁石型回転電機においてそれぞれ式(21)、(22)をみたすような構成にしたことにより、渦電流の原因となる電機子起磁力の特定の調波成分の空間次数 N を大きくするのに、 $2P > S$ の場合に比べて少ない極数で実現可能なので、回転子の渦電流損を低減できるという効果があるとともに磁極の加工費を特に少なくできるという効果がある。さらに、巻線係数が高いため、磁石の使用量を少なくすることができるため低コストな回転電機を提供できるという効果がある。また、極数とスロット数の最小公倍数が大きいと、コギングトルクが小さく、風速が小さくとも風車が起動し発電を開始することができるという効果もある。

40

【 0 1 0 2 】

実施の形態4 .

図15に本実施の形態を示す。本実施の形態においては、図15に示すように、回転子

50

のヨーク5の表面に永久磁石4が固定されており、また、この永久磁石4は回転子の軸方向に分割された構成となっている。また、分割された個々の永久磁石4の間は電氣的に絶縁されている。他の構成については、上記の実施の形態1と同様であるため、ここでは説明を省略する。

【0103】

近年、希土類系の磁石がよく用いられるようになってきているが、希土類磁石は導電率が高いため、渦電流が問題になることがある。そこで、これまで述べたように極対数Pと起磁力の空間次数Nと回転子の外径Dを式(19)をみたすような組み合わせとし、さらに、図15に示すように永久磁石4を分割した構成にすることにより、回転子全体における渦電流損を低減できる他、磁石自身に発生する渦電流損を大幅に低減し、永久磁石4の発熱を抑制することができる上、高効率な永久磁石型回転電機を得ることができるという効果がある。

10

【0104】

以下にこの発明の効果を述べる。

【0105】

この発明は、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する永久磁石型回転電機であって、上記回転子の磁極の極対数をP、上記回転子の直径をD[m]とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数をN(機械角360度を1次とする)とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} として、上記Dを $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上としたとき、上記回転子に発生する渦電流損の割合を評価するパラメータX(単位はm)を

20

$$X = (N + P)^{1.5} N^{-4} P^2 D$$

と定義し、上記Xの値が所定の値より小さくなるように、上記、P、D、Nの値を選択する構成とした永久磁石型回転電機であるので、このような構成としたことにより、永久磁石型回転電機が大形化しても、回転子の渦電流の原因となる特定の電機子起磁力の空間次数Nを大きくすることができ、回転子に発生する渦電流を低減することが可能となる。その結果、回転子の発熱を抑制できるという効果があると同時に、回転電機の高効率化を図ることができるという効果もある。さらに、従来例に述べられているように回転子のヨークを区分したり、絶縁分割したりといった複雑でコストのかかる構造にしなくとも、ヨークを一体型にした構造を保ちつつ、回転子の渦電流損を低減することができるという効果がある。

30

【0106】

また、この発明は、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する永久磁石型回転電機であって、上記回転子の磁極の極対数をP、上記回転子の直径をD[m]とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数をN(機械角360度を1次とする)とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} として、上記Dを $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上としたとき、上記、P、D、Nが

【0107】

【数33】

40

$$(N + P)^{1.5} N^{-4} P^2 D < 0.6 \quad (\text{単位は m})$$

【0108】

を満たす構成とした永久磁石型回転電機であるので、このような構成としたことにより、永久磁石型回転電機が大形化しても、回転子の渦電流の原因となる特定の電機子起磁力の空間次数を大きくすることができ、回転子に発生する渦電流を低減することが可能となる。その結果、回転子の発熱を抑制できるという効果があると同時に、回転電機の高効率化

50

を図ることができるという効果もある。さらに、従来例に述べられているように回転子のヨークを区分したり、絶縁分割したりといった複雑でコストのかかる構造にしなくとも、ヨークを一体型にした構造を保ちつつ、回転子の渦電流損を低減することができるという効果がある。

【0109】

また、上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P < S$ の関係を満たすようにしたので、このような構成にしたことにより、渦電流の原因となる電機子起磁力の特定の調波成分の空間次数 N を大きくするのに、 $2P > S$ である永久磁石型回転電機と比較して、少ない極数で実現可能なので、回転子の渦電流損を低減できるという効果があるとともにも磁極の加工費を少なくできるという効果がある。

10

【0110】

また、上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 2 : 3$ の関係を満たすとともに、上記 P と上記 D とが、

【0111】

【数34】

$$P^{-0.5}D < 1.85 \quad (\text{単位は m})$$

20

【0112】

の関係を満たす構成としたので、このような構成にしたことにより、渦電流の原因となる電機子起磁力の特定の調波成分の空間次数 N を大きくするのに、特に少ない極数で実現可能なので、回転子の渦電流損を低減できるという効果があるとともにも磁極の加工費を特に少なくできるという効果がある。

【0113】

また、上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 8 : 9$ の関係を満たすとともに、上記 P と上記 D とが、

【0114】

【数35】

30

$$P^{-0.5}D < 0.43 \quad (\text{単位は m})$$

【0115】

の関係を満たすようにしたので、このような構成にしたことにより、渦電流の原因となる電機子起磁力の特定の調波成分の空間次数 N を大きくするのに、少ない極数で実現可能なので、回転子の渦電流損を低減できるという効果があるとともにも、磁極の加工費を少なくできるという効果がある。さらに、極数とスロット数の最小公倍数が大きいためコギングトルクを低減できるという効果がある。また巻線係数が高いため磁石の使用量を低減できるので、低コスト化が図れるという効果がある。

40

【0116】

また、上記固定子のスロット数を S としたとき、上記 P と上記 S とが、 $2P : S = 10 : 12$ の関係を満たすとともに、上記 P と上記 D とが、

【0117】

【数36】

$$P^{-0.5}D < 0.62 \text{ (単位は m)}$$

【0118】

の関係を満たすようにしたので、このような構成にしたことにより、渦電流の原因となる電機子起磁力の特定の調波成分の空間次数Nを大きくするのに、少ない極数で実現可能なので、回転子の渦電流損を低減できるという効果があるとともに回転子の渦電流損を低減できるという効果がある。さらに、極数とスロット数の最小公倍数が大きいためコギングトルクを低減できるという効果がある。また巻線係数が高いため磁石の使用量を低減できるので、低コスト化が図れるという効果がある。

10

【0119】

また、上記回転子の磁極を構成する上記永久磁石を軸方向に分割して区分構造としたことにより、磁石に発生する渦電流損を低減することができるため磁石の発熱を抑制することができる上、高効率な永久磁石型回転電機を得ることができるという効果がある。

【0120】

また、この発明は、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する風力発電用永久磁石型同期発電機であって、上記回転子の磁極の極対数をP、上記回転子の直径をD[m]とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数をN(機械角360度を1次とする)とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} として、上記Dを $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上としたとき、上記回転子に発生する渦電流損の割合を評価するパラメータX(単位はm)

20

$$X = (N + P)^{1.5} N^{-4} P^2 D$$

と定義し、上記Xの値が所定の値より小さくなるように、上記、P、D、Nの値を選択する構成とした風力発電用永久磁石型同期発電機であるので、このような構成とすることにより、風力発電用永久磁石型同期発電機、特にギヤレス型風力発電システムに組みこまれる回転子径が1mを超えるような大形の永久磁石型同期発電機においても、回転子に発生する渦電流損を低減することができ、結果として回転子の発熱を抑制できると同時に発電機の高効率化を実現できる。さらに、従来例に述べられているように回転子のヨークを区分したり、絶縁分割したりといった複雑でコストのかかる構造にしなくとも、ヨークを一体型にした構造を保ちつつ、回転子の渦電流損を低減することができるという効果がある。

30

【0121】

また、この発明は、永久磁石による複数の磁極を有する回転子と電機子巻線がティースに集中的に巻き回された固定子とを有する風力発電用永久磁石型同期発電機であって、上記回転子の磁極の極対数をP、上記回転子の直径をD[m]とし、上記固定子の電機子起磁力の所定の調波成分の空間次数をN(機械角360度を1次とする)とし、上記永久磁石型回転電機の出力を P_{out} として、上記Dを $D = 0.00045 P_{out} + 1.2$ 以上としたとき、上記、P、D、Nが

40

【0122】

【数37】

$$(N+P)^{1.5} N^{-4} P^2 D < 0.6 \text{ (単位は m)}$$

【0123】

を満たす構成とした風力発電用永久磁石型同期発電機であるので、このような構成とすることにより、風力発電用永久磁石型同期発電機、特にギヤレス型風力発電システム

50

に組みこまれる回転子径が1 mを超えるような大形の永久磁石型同期発電機においても、回転子に発生する渦電流損を低減することができ、結果として回転子の発熱を抑制することができると同時に発電機の高効率化を実現できる。さらに、従来例に述べられているように回転子のヨークを区分したり、絶縁分割したりといった複雑でコストのかかる構造にしくとも、ヨークを一体型にした構造を保ちつつ、回転子の渦電流損を低減することができるという効果がある。

【0124】

産業上の利用可能性

以上のように、本発明の永久磁石型回転電機は、風力発電等の種々の発電に用いると有用である。

10

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機の構成を示した断面図である。

【図2】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機における電機子起磁力を示した説明図である。

【図3】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機における起磁力波形のフーリエ解析結果（極数：スロット数 = 2：3のとき）を示した説明図である。

【図4】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機における磁束の時間的変化と回転子に生じる渦電流の経路を示した説明図である。

【図5】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機における起磁力波形のフーリエ解析結果（極数：スロット数 = 4：3のとき）を示した説明図である。

20

【図6】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機における起磁力波形のフーリエ解析結果（極数：スロット数 = 10：9のとき）を示した説明図である。

【図7】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機における起磁力波形のフーリエ解析結果（極数：スロット数 = 8：9のとき）を示した説明図である。

【図8】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機における起磁力波形のフーリエ解析結果（極数：スロット数 = 10：12のとき）を示した説明図である。

【図9】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機の仕様の例を示した説明図である。

【図10】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機におけるパラメータXと渦電流損の割合の変化を示した説明図である。

30

【図11】 本発明の実施の形態2による風力発電システムの構成を示した構成図である。

【図12】 本発明の実施の形態2による風力発電システムの他の例を示した構成図である。

【図13】 本発明の実施の形態3による永久磁石型発電機における極数スロット数の組み合わせによる渦電流損の割合を示した説明図である。

【図14】 本発明の実施の形態3による永久磁石型発電機における（スロット数/極数）に対する渦電流損の割合を示した説明図である。

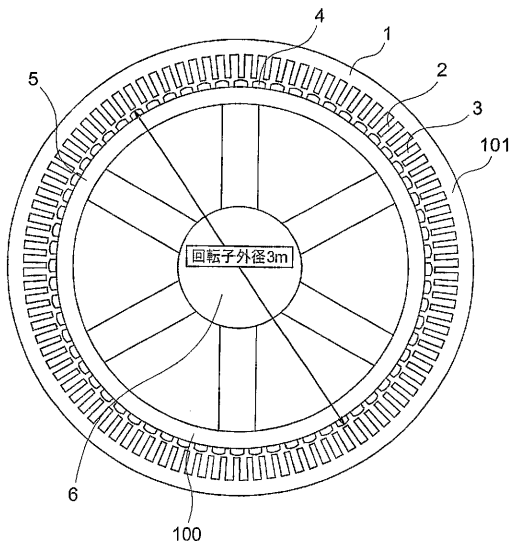
【図15】 本発明の実施の形態4による永久磁石型同期発電機の構成を示した部分斜視図である。

40

【図16】 本発明の実施の形態1による永久磁石型同期発電機における発電機の出力と回転子外径との関係を示した説明図である。

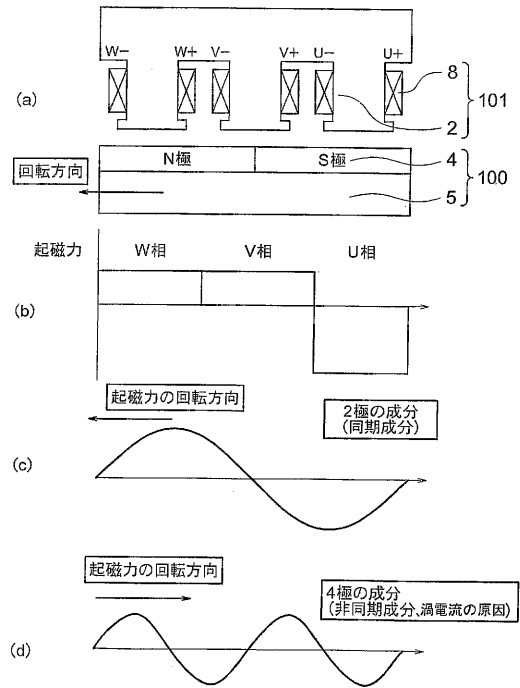
【図1】

図1



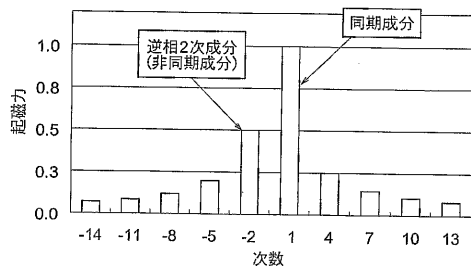
【図2】

図2



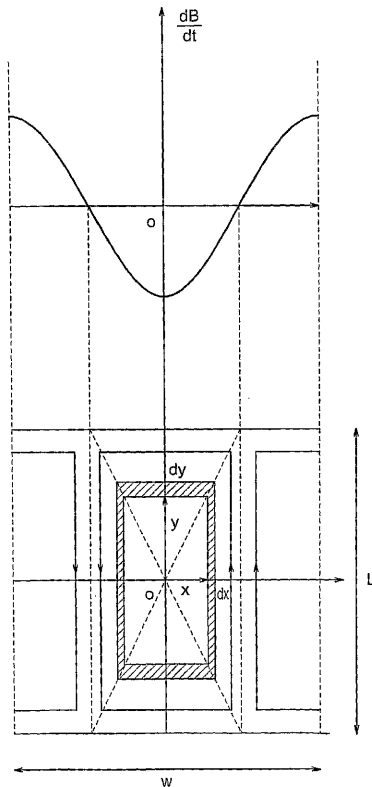
【図3】

図3



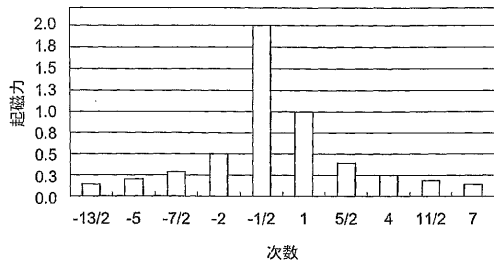
【図4】

図4



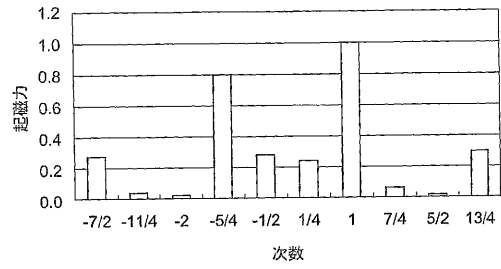
【 図 5 】

図 5



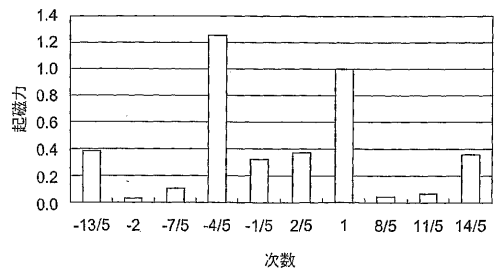
【 図 7 】

図 7



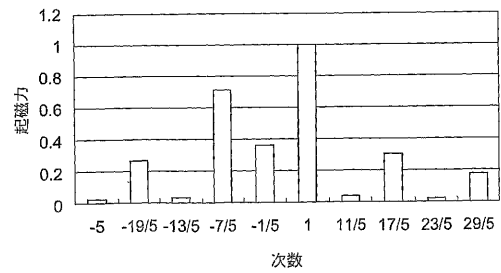
【 図 6 】

図 6



【 図 8 】

図 8



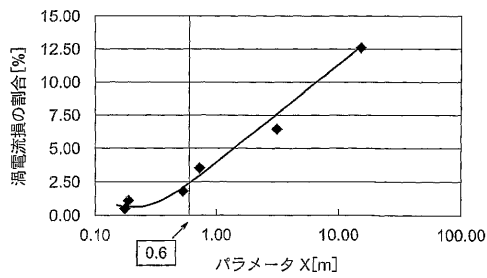
【 図 9 】

図 9

極対数P	スロット数	次数N	回転子外径D[m]	X[m]	渦電流損の割合[%]
48	144	96	4.0	0.19	1.16
32	48	16	3.0	15.59	12.63
30	54	24	3.0	3.23	6.50
32	72	40	3.0	0.73	3.60
30	72	42	3.0	0.53	1.95
32	96	64	3.0	0.17	0.60

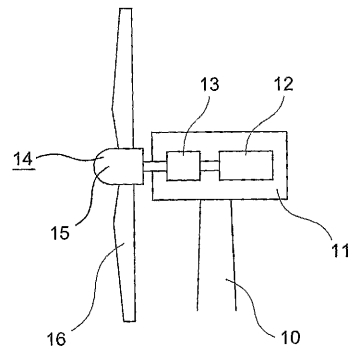
【 図 1 0 】

図 1 0



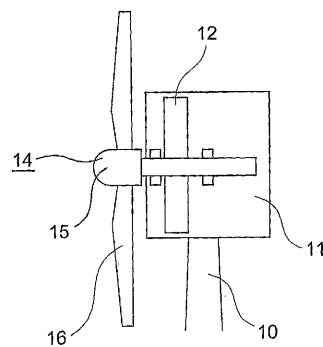
【 図 1 1 】

図 1 1



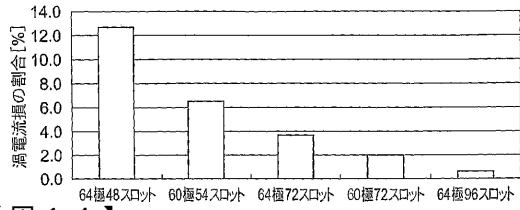
【 図 1 2 】

図 1 2



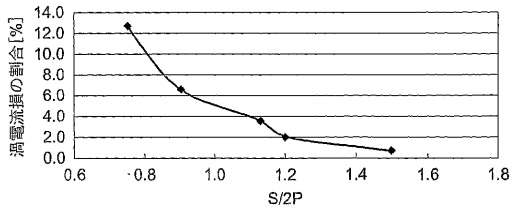
【 図 1 3 】

図 1 3



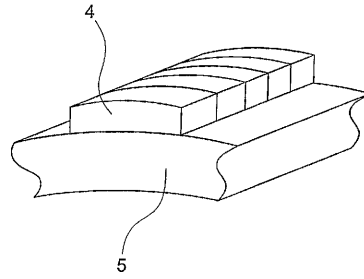
【 図 1 4 】

図 1 4



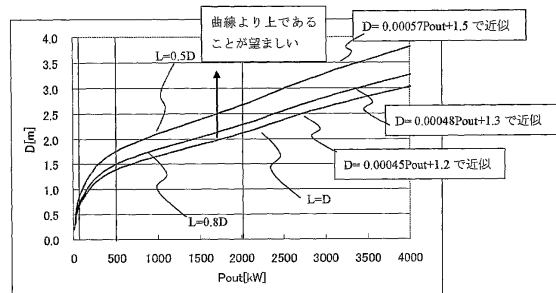
【 図 1 5 】

図 1 5



【 図 1 6 】

図 1 6



フロントページの続き

- (72)発明者 中野 正嗣
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 米谷 晴之
東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
- (72)発明者 川村 光弘
東京都港区三田三丁目13番16号 ティーエムエイエレクトリック株式会社内
- (72)発明者 池田 祐次
東京都港区三田三丁目13番16号 ティーエムエイエレクトリック株式会社内

審査官 山村 和人

- (56)参考文献 特開2000-197392(JP,A)
特開2001-054271(JP,A)
特開平11-098729(JP,A)
特開平10-304641(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02K 21/14
H02K 1/27