

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2019-58002

(P2019-58002A)

(43) 公開日 平成31年4月11日(2019.4.11)

(51) Int.Cl.
H02P 9/00 (2006.01)

F I
H02P 9/00

テーマコード(参考)
5H590

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号 特願2017-181182 (P2017-181182)
(22) 出願日 平成29年9月21日 (2017.9.21)

(出願人による申告)平成27年度国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「次世代洋上直流送電システム開発事業」産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 800000068
学校法人東京電機大学
東京都足立区千住旭町5番
(74) 代理人 100107766
弁理士 伊東 忠重
(74) 代理人 100070150
弁理士 伊東 忠彦
(72) 発明者 西方 正司
東京都足立区千住旭町5番 学校法人東京電機大学内
Fターム(参考) 5H590 AA12 CA14 CD01 CD03 CE01
EB07 EB15 EB21 FA08 GA07
HA02 HA04 HA08

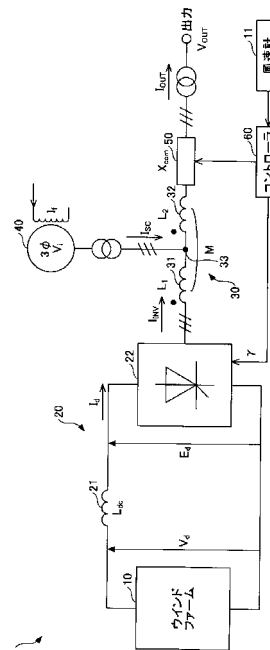
(54) 【発明の名称】 発電システム

(57) 【要約】

【課題】システム出力の力率を任意に制御できる発電システムを提供する。

【解決手段】風力発電システム1は、発電機としてのウインドファーム10及び変換ユニット20と、変換ユニット20の出力端に接続される同期調相機40と、変換ユニット20と同期調相機40との合流点である直列接続点33より出力側に設けられ、直列接続点33より出力側のリアクタンスXcomを調整する調整部としての補償リアクトル50と、を備える。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

発電機と、
前記発電機の出力端に接続される同期機と、
前記発電機と前記同期機との合流点より出力側に設けられ、前記合流点より出力側のリアクタンスを調整する調整部と、
を備える発電システム。

【請求項 2】

前記調整部は、リアクタンスを変更可能な補償リアクトルである、
請求項 1 に記載の発電システム。

10

【請求項 3】

前記発電機が、風力発電機である、
請求項 1 または 2 に記載の発電システム。

【請求項 4】

前記発電機と前記同期機との間に波形改善部を備え、
前記調整部は前記波形改善部の出力端に接続される、
請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の発電システム。

【請求項 5】

前記調整部は、前記発電機の出力変動に応じて、システム出力の力率角を一定に維持するように前記リアクタンスを調整する、
請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の発電システム。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、発電システムに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、風力発電システムに同期機を組み合わせるにより、システム出力の安定化を図ることが提案されている（例えば特許文献 1）。

【0003】

また、近年、世界各国では発電関連設備の安全性、信頼性を担保するための法規制、所謂グリッドコードが定められている。ある国に風車を納入する際には、この国のグリッドコードに沿った製品でなければ国内で使用できない。例えば非特許文献 1 に記載されるように、デンマークのグリッドコードでは、有効電力を 1 p u (per unit) 供給するときには、無効電力も ± 0.33 p u の範囲として、進み力率 0.95 から遅れ力率 0.95 の範囲で電力を供給することが要求される。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2015 - 002597 号公報

40

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献 1】V. Yaramasu 他、"High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies"、Proceedings of the IEEE、2015 年 5 月、Vol.103、No.5、p.740 ~ 788

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

特許文献 1 に記載の従来の発電システムでも、各国のグリッドコードに対応できるように、システム出力の有効電力だけでなく無効電力も制御できる、すなわち、システム出力の

50

力率を任意に制御できることが望ましい。

【0007】

本開示は、システム出力の力率を任意に制御できる発電システムを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の実施形態の一観点に係る発電システムは、発電機と、前記発電機の出力端に接続される同期機と、前記発電機と前記同期機との合流点より出力側に設けられ、前記合流点より出力側のリアクタンスを調整する調整部と、を備える。

【発明の効果】

10

【0009】

本開示によれば、システム出力の力率を任意に制御できる発電システムを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】本発明の一実施形態に係る発電システムの一例としての風力発電システムの概略構成を示す機能ブロック図である。

【図2】図1に示す風力発電システムのインバータ出力側の等価回路を示す図である。

【図3】所定条件下で、図1及び図2に示した風力発電システムにおいて、システム出力が1 puのときに進み力率 $p f = 0.95$ を実現するフェーザ図である。

20

【図4】所定条件下で、図1及び図2に示した風力発電システムにおいて、システム出力が0.5 puのときに進み力率 $p f = 0.95$ を実現するフェーザ図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、添付図面を参照しながら実施形態について説明する。説明の理解を容易にするため、各図面において同一の構成要素に対しては可能な限り同一の符号を付して、重複する説明は省略する。

【0012】

図1は、本発明の一実施形態に係る発電システムの一例としての風力発電システム1の概略構成を示す機能ブロック図である。

30

【0013】

本実施形態の風力発電システム1は、風力発電機の出力を一旦コンバータ（図示せず）で直流電力に変換し、インバータ22により再度一定の電圧及び周波数の交流電力に変換して、三相負荷または電力系統などの出力先（以下では単に「負荷」とも表記する）に供給するDCリンク方式の風力発電システムである。

【0014】

風力発電システム1は、図1に示すように、ウインドファーム10（発電機）と、変換ユニット20（発電機）と、波形改善リアクトル30（波形改善部）と、同期調相機40（同期機）と、補償リアクトル50（調整部）と、コントローラ60と、を有する。

【0015】

40

ウインドファーム10は、風力発電を行うための複数の発電用風車（図示せず）を有し、これらの風車を電氣的に接続して構成される施設である。なお、ウインドファーム10の各風車は直列または並列に接続され、ウインドファーム10はこれらの風車により生成された直流電力を合成して出力する。なお、風力発電システム1は、発電機としてウインドファームの代わりに単数の発電用風車を有する構成でもよい。

【0016】

変換ユニット20は、ウインドファーム10の各風車からそれぞれ出力される直流電力の総和を入力し、その総和を交流電力に変換する。例えば変換ユニット20は、直流リアクトル21とインバータ22とを有する。直流リアクトル21は、ウインドファーム10から送られた直流電流を平滑化する。図1に示した例では、直流リアクトル21はインダ

50

クタンズ L_{dc} のコイルから成る構成を示しているが、他の構成としてもよい。

【0017】

インバータ 22 は、直流リアクトル 21 によって平滑化された直流電流を交流電流に変換する。インバータ 22 には、例えば他励式サイリスタインバータが採用可能である。ただし、サイリスタインバータ以外のインバータであっても、外部からの信号によって入力電圧 E_d を制御可能な、自己消弧型素子を用いた電流形インバータであれば、インバータ 22 に採用可能である。入力電圧 E_d を制御するための、インバータ 22 の外部から調整可能なパラメータを、以下において「インバータパラメータ」という。インバータ 22 にサイリスタインバータを採用した場合は、制御進み角 α を調整することにより、入力電圧 E_d が制御される。つまり、制御進み角 α がインバータ 22 のインバータパラメータである。

10

【0018】

変換ユニット 20 により出力された交流電力は、波形改善リアクトル 30 に入力される。本実施形態では、ウインドファーム 10 及び変換ユニット 20 が、交流電力を出力する発電機として機能する。変換ユニット 20 が出力する交流電力のうちの交流電流を、以下では「インバータ出力電流 I_{INV} 」とも表記する。なお、本実施形態では、インバータ 22 は電流形であるため、インバータ出力電流 I_{INV} はほぼ方形波形状となる。

【0019】

波形改善リアクトル 30 は、変換ユニット 20 を介してウインドファーム 10 の出力端に接続されている。図 1 に示した例では、波形改善リアクトル 30 は、変換ユニット 20 の出力端に直列に接続された 2 つのコイル 31, 32 を有する。両コイル 31, 32 は、同一鉄心上に図示の極性で巻装されている。

20

【0020】

波形改善リアクトル 30 は、図 1 に示すように、2 つのコイル 31, 32 の自己インダクタンス L_1, L_2 と、両コイル 31, 32 間の相互インダクタンス M を適切に選定することにより、同期調相機 40 の初期過渡インダクタンスを等価的に打ち消すことができる。この結果、変換ユニット 20 のインバータ 22 のサイリスタの転流時に発生する出力電圧の跳躍や陥没などの歪みを本質的に除去することができ、これにより、常に高品質の電力を出力することができる。

【0021】

また、図 1 に示すように、波形改善リアクトル 30 の両コイル 31, 32 の間の直列接続点 33 (合流点) が、同期調相機 40 と接続されている。この接続により、波形改善リアクトル 30 は、ウインドファーム 10 が出力する交流電力と、同期調相機 40 が出力する電力とを合成した電力を出力する。

30

【0022】

同期調相機 40 は、変換ユニット 20 のインバータ 22 のサイリスタの転流と、風力発電システム 1 の出力先の負荷とが必要とする無効電力を供給する役割を担う。なお、同期調相機 40 は、界磁電流 I_f を調整することによって、内部誘導起電力 V_i を調整でき、これにより無効電力の出力を調整できる。

図 2 は、図 1 に示す風力発電システム 1 のインバータ出力側の等価回路を示す図である。図 2 では、波形改善リアクトル 30 は、相互誘導の無い回路に等価交換されている。図 2 において、波形改善リアクトル 30 の仮想接続点 33 A よりインバータ 22 側のインダクタンス L は、 $L = L_1 + M$ である。波形改善リアクトル 30 の仮想接続点 33 A より同期調相機 40 側のインダクタンス L は、 $L = -M$ である。波形改善リアクトル 30 の仮想接続点 33 A より出力側のインダクタンス L は、 $L = L_2 + M$ である。

40

【0023】

補償リアクトル 50 は、図 1 に示すように、変換ユニット 20 の出力と同期調相機 40 の出力との合流点である直列接続点 33 より出力側に設けられる。より詳細には、波形改善リアクトル 30 のコイル 32 より出力側に設けられ、波形改善リアクトル 30 の 2 つのコイル 31, 32 と直列接続される。補償リアクトル 50 は、リアクタンス X_{com} を変

50

更可能であり、これにより、直列接続点 33 より出力側のリアクタンスを調整できる。図 2 の等価回路で考えると、波形改善リアクトル 30 の仮想接続点 33 A より出力側の等価リアクタンス X と、補償リアクトル 50 のリアクタンス X_{com} との和 ($X + X_{com}$) を調整することができる。

【0024】

補償リアクトル 50 は、例えば、コイルの巻き数を変更できる可変コイルや、異なるリアクタンスをもつ複数のコイルをスイッチで切りかえる構成によって実装できる。

【0025】

コントローラ 60 は、ウインドファーム 10、変換ユニット 20、補償リアクトル 50 などの風力発電システム 1 の各要素の動作を制御する。例えば、コントローラ 60 は、風速計 11 の測定値である風速に応じて、インバータ 22 の制御進み角 θ をリアルタイムで制御する。インバータ 22 は、制御進み角 θ の調整によって入力電圧 E_d を調整することができる。また、コントローラ 60 は、風速に応じて、補償リアクトル 50 のリアクタンス X_{com} をリアルタイムで制御する。補償リアクトル 50 のリアクタンスの調整によってシステム出力の力率 pf を制御できる。

10

【0026】

なお、コントローラ 60 によるインバータ 22 の制御進み角 θ の制御など、風力発電システム 1 の全体的な動作に係る制御については、例えば特許文献 1 に記載されているのでここでは説明を省略する。

【0027】

図 3、図 4 を参照して、コントローラ 60 による補償リアクトル 50 の制御について説明する。コントローラ 60 は、ウインドファーム 10 の出力変動に応じて、システム出力 P_{OUT} の力率 pf を一定に維持するように補償リアクトル 50 のリアクタンス X_{com} を調整する。ここでシステム出力 $P_{OUT} = 3 \times V_{OUT} \times I_{OUT} \times pf$ で表される。

20

【0028】

例えば、インバータ 22 の基本波進み角 $\theta - \pi/2$ を 30° 、波形改善リアクトル 30 の仮想接続点 33 A における交流電圧 V_μ を $2/3 pu$ (一定)、出力電圧 V_{OUT} を $1 pu$ (一定) との条件を設定した場合を考える。

【0029】

図 3 は、上記の条件下で、図 1 及び図 2 に示した風力発電システム 1 において、システム出力 P_{OUT} が $1 pu$ のときに進み力率 $pf = 0.95$ を実現するフェーザ図である。図 3 のフェーザ図では、風力発電システム 1 の各部の交流電流及び交流電圧の各値 I_{INv1} (I_{INv} の基本波)、 I_{sc1} (I_{sc} の基本波)、 I_{OUT} 、 V_μ 、 V_{OUT} を複素フェーザで表している。なお、図 3 及び図 4 では、複素電圧フェーザ及び複素電流フェーザを次のように、文字の上部にドットを付けたベクトル表記としているが、本文ではドットを付けずに「フェーザ V 」、「フェーザ I 」と表記する。

30

【数 1】

\dot{V} (複素電圧フェーザ)

\dot{I} (複素電流フェーザ)

40

【0030】

図 3 において、フェーザ V_{OUT} はシステム出力の電圧フェーザを示す。フェーザ I_{OUT} はシステム出力の電流フェーザを示し、進み力率 $pf = 0.95$ を実現するため、フェーザ V_{OUT} に対して力率角 $\theta = \cos^{-1}(pf) = 18.2^\circ$ だけ進んでいる。

50

【0031】

フェーザ I_{INV1} はインバータ出力電流 I_{INV} の基本波の電流フェーザを示す。フェーザ I_{INV1} は、基本波進み角 $-u/2 = 30$ (deg) を満たすように、実数部 I_{INV1re} と虚数部 I_{INV1im} が定められる。フェーザ V_{μ} は、仮想接続点 33A における電圧フェーザを示す。フェーザ I_{SC1} は、同期調相機 40 の電機子電流 I_{SC} の基本波の電流フェーザを示す。フェーザ I_{SC1} は、同期調相機 40 が有効電力を発生しないので、電圧フェーザ V_{μ} と直交する。

【0032】

フェーザ $j(X + X_{com}) \cdot I_{OUT}$ は、仮想接続点 33A より出力側のリアクタンス (すなわち波形改善リアクトル 30 のコイル 32 の等価リアクタンス X と、補償リアクトル 50 のリアクタンス X_{com} の和) による電圧フェーザを示す。

10

【0033】

図 3 に示すように、フェーザ図上では、フェーザ I_{OUT} がフェーザ I_{INV1} とフェーザ I_{SC1} とのベクトル和で表され、フェーザ V_{μ} がフェーザ V_{OUT} とフェーザ $j(X + X_{com}) \cdot I_{OUT}$ とのベクトル和で表される。

【0034】

図 4 は、上記の条件下で、図 1 及び図 2 に示した風力発電システム 1 において、システム出力 P_{OUT} が $0.5 pu$ のときに進み力率 $pf = 0.95$ を実現するフェーザ図である。図 4 のフェーザ図の概要は図 3 と同様である。

【0035】

図 4 は、システム出力 P_{OUT} が図 3 と比較して減少している状態を示すフェーザ図である。上記条件のとおりフェーザ V_{OUT} は一定なので、図 4 に示すように、フェーザ I_{OUT} が図 3 と比較して減少している。フェーザ I_{SC1} がフェーザ V_{μ} と直交することは図 3 と変わらないので、フェーザ I_{OUT} の減少と共にフェーザ I_{INV1} も図 3 と比べて減少している。つまり、図 4 のフェーザ図は、風力の減少などの原因によりインバータ出力電流 I_{INV1} (すなわちウインドファーム 10 の出力) が減少することによって、システム出力 P_{OUT} が減少している状態を示す。

20

【0036】

ここで、本実施形態の風力発電システム 1 とは異なり、システムに補償リアクトル 50 を設けない構成、すなわち、仮想接続点 33A より出力側のリアクタンスが固定値である構成を考える。この構成では、図 3、図 4 のフェーザ $j(X + X_{com}) \cdot I_{OUT}$ がフェーザ $jX \cdot I_{OUT}$ となる。この場合、図 4 に示すフェーザ I_{INV1} 及びフェーザ I_{OUT} の減少に伴って、フェーザ $jX \cdot I_{OUT}$ も減少する。そうすると、フェーザ V_{OUT} がフェーザ I_{OUT} に接近して力率角が減少し、システム出力の進み力率が 0.95 ではなくなる。つまり、ウインドファーム 10 の出力変動に応じて、システム出力 P_{OUT} の力率 pf も変動してしまう。

30

【0037】

これに対して本実施形態の風力発電システム 1 では、システムの仮想接続点 33A より出力側にリアクタンス X_{com} を変更可能な補償リアクトル 50 が設けられる。この構成により、仮想接続点 33A より出力側のリアクタンスを任意に調整できる。

40

【0038】

図 3、図 4 に示すように、システム出力 P_{OUT} の力率 $pf = 0.95$ を一定に維持するためには、フェーザ図において力率角 18.2° を維持できればよい。このためには、フェーザ I_{INV1} 及びフェーザ I_{OUT} が変動しても、仮想接続点 33A より出力側のリアクタンスによる電圧フェーザ $j(X + X_{com}) \cdot I_{OUT}$ を一定に維持する必要がある。例えば、図 4 に示すように I_{OUT} が減少した場合には、 X_{com} を増やしてフェーザ $j(X + X_{com}) \cdot I_{OUT}$ を一定に維持することにより、フェーザ V_{μ} 、 V_{out} 、フェーザ $j(X + X_{com}) \cdot I_{OUT}$ の幾何学的関係を一定に維持できる。これにより、力率角を一定に維持でき、システム出力 P_{OUT} の進み力率 pf を 0.95 に維持できる。

50

【0039】

なお、図3、図4に示すフェーザ図において、システム出力 P_{OUT} の進み力率 $p_f = 0.95$ を維持するためには、フェーザ $j(X + X_{com}) \cdot I_{OUT}$ の長さを $0.9685 pu$ で一定とすればよい。同様に、フェーザ $j(X + X_{com}) \cdot I_{OUT}$ の長さを $0.577 pu$ で一定とすれば、システム出力 P_{OUT} の力率 p_f を1に固定でき、 $0.3442 pu$ で一定とすればシステム出力 P_{OUT} を遅れ力率 $p_f = 0.95$ で維持できる。

【0040】

このように、本実施形態の風力発電システム1は、ウインドファーム10の出力端と同期調相機40の出力とが合流する直列接続点33より出力側に、直列接続点33より出力側のリアクタンスを調整する調整部として、リアクタンス X_{com} を変更可能な補償リアクトル50を備える。この構成により、例えば風速が変動することなどによりウインドファーム10の出力が変動した場合でも、システム出力 P_{OUT} の力率 p_f を所望の値で維持でき、任意に制御できる。これにより、システム出力 P_{OUT} の有効電力だけでなく無効電力も制御可能となり、世界各国のグリッドコードに適した電力供給が可能となり、システムの汎用性を向上できる。

10

【0041】

また、本実施形態の風力発電システム1は、補償リアクトル50を設けてシステム出力 P_{OUT} の力率 p_f を任意に制御できるので、システム出力 P_{OUT} の無効電力も任意に制御できる。変換ユニット20のインバータ22のサイリスタの転流余裕角 μ は、システム出力 P_{OUT} の無効電力に応じて変動することが知られており、システム出力 P_{OUT} の力率 p_f が変動して無効電力が変動した際に、転流余裕角 μ が最低角より小さくなると転流失敗の虞がある。本実施形態では無効電力を任意に制御できるので、例えば無効電力を一定に制御すれば、転流余裕角 μ もほぼ一定に維持することが可能となり、転流失敗を防止できる。

20

【0042】

また、本実施形態の風力発電システム1は、変換ユニット20と同期調相機40との間に波形改善リアクトル30を備え、補償リアクトル50が波形改善リアクトル30の出力端に接続される。

【0043】

この構成により、変換ユニット20のインバータ22のサイリスタの転流時に発生する出力電圧の跳躍や陥没などが、波形改善リアクトル30により除去できるので、常に高品質の電力を出力することができる。

30

【0044】

以上、本発明の実施形態を説明したが、上記実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。上記実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行なうことができる。上記実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

【0045】

上記実施形態では、直列接続点33より出力側のリアクタンスを調整する調整部として補償リアクトル50を例示したが、直列接続点33より出力側のリアクタンスを調整できれば他の要素を適用してもよい。例えばコンデンサを調整部として適用できる。この場合、調整部は、静電容量を変更できる可変コンデンサや、異なる静電容量をもつ複数のコンデンサをスイッチで切りかえる構成によって実装できる。

40

【0046】

上記実施形態では、風力発電システム1を例示して説明したが、発電機は風力発電機に限られない。風力発電機以外の発電機を適用する場合には、図1のシステム図上で、ウインドファーム10を別方式の発電機に置き換えればよい。

【0047】

50

上記実施形態では、風力発電システム 1 が同期調相機 4 0 を備える構成を例示したが、風力発電システム 1 は同期機を備えればよく、同期調相機 4 0 の代わりに同期発電機を備える構成としてもよい。同期発電機は、同期調相機と同様に、変換ユニット 2 0 のインバータ 2 2 のサイリスタの転流と、風力発電システム 1 の出力先の負荷とが必要とする無効電力を供給すると共に、さらに、風力発電システム 1 の出力先の負荷が要求する有効電力のうち、ウインドファーム 1 0 からの出力で賄うことのできない不足分の有効電力を供給する機能を担う。

【 0 0 4 8 】

また、上記実施形態では、波形改善リアクトル 3 0 が直列接続された 2 つのコイルから成り、両コイルの直列接続点 3 3 にて同期調相機 4 0 が接続される構成を例示したが、波形改善リアクトル 3 0 は他の構成としてもよい。例えば、波形改善リアクトル 3 0 の両端部にウインドファーム 1 0 及び同期調相機 4 0 がそれぞれ接続され、波形改善リアクトル 3 0 の 2 つのコイルの直列接続点 3 3 にて出力側の補償リアクトル 5 0 に接続される構成であってもよい。

10

【 0 0 4 9 】

また、上記実施形態では、ウインドファーム 1 0 と同期調相機 4 0 との間に波形改善リアクトル 3 0 を備える構成を例示したが、風力発電システム 1 は、波形改善リアクトル 3 0 を含まない構成とすることも可能である。

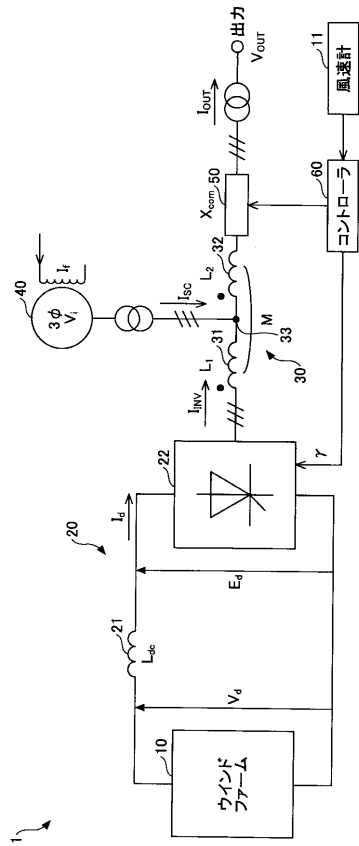
【 符号の説明 】

【 0 0 5 0 】

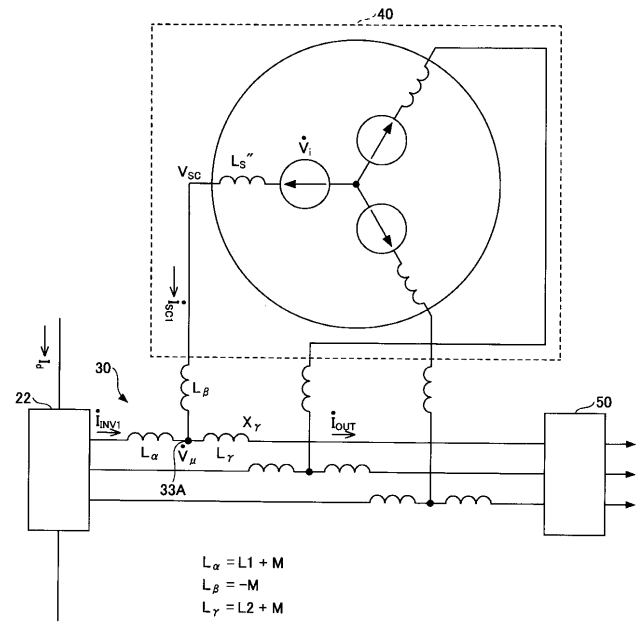
- 1 0 ウインドファーム（発電機）
- 3 0 波形改善リアクトル（波形改善部）
- 3 3 直列接続点（合流点）
- 3 3 A 仮想接続点
- 4 0 同期調相機（同期機）
- 5 0 補償リアクトル（調整部）

20

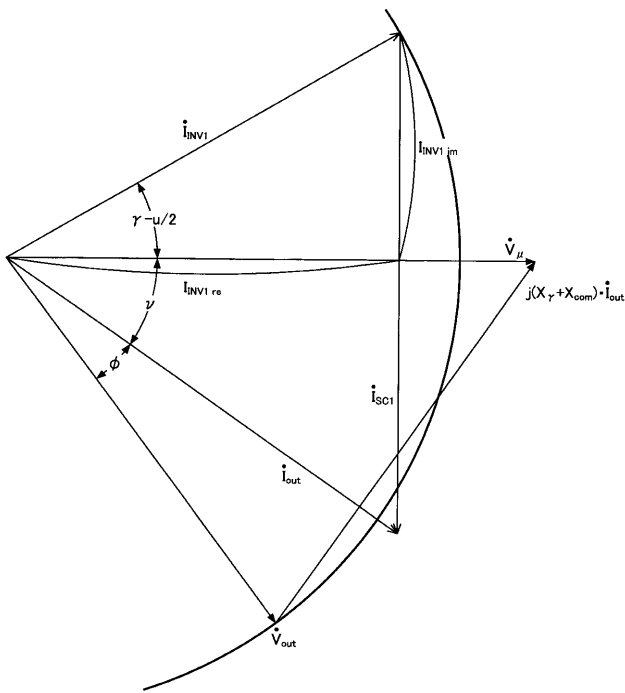
【図 1】



【図 2】



【図 3】



【図 4】

