

# 巻線形誘導発電機を用いた風力発電システムの可変速制御

宮川 隆寛

## A Variable Speed Control of Wind Power System Using Wound Rotor Induction Generator

Takahiro MIYAKAWA

### Abstract

In wind power system, the fractional rotational speed causes the changes in electrical input power when the blade of the windmill passes the tower on the way down. In this paper, we propose a new method of suppressing the tower shadow effect using secondary excitation of wound rotor induction generator, and it is shown by simulation results that this approach is so useful for active power and reactive power control.

**Keywords :** wind power system, wound rotor induction generator, windshare, tower shadow effect

### 1. まえがき

近年、エネルギー資源の枯渇や地球温暖化など世界を取り巻く環境に対する意識が高まり、クリーンな発電方式として風力発電の導入量が年々増加している。しかし、風力発電は風速変動による出力変動による発電電力が時々刻々と変化するため、電力系統へ連系した場合、設備容量が増加し電力品質の維持にコストがかかる。そこで本研究では、風力発電方式として変動する入力である風速に対して可変速回転制御方式を付加した巻線形誘導発電機を用いた風力発電システムについて検討する。巻線形誘導発電機の可変速制御方式として回転子に加える電圧、電流を調整して電力を制御する二次励磁方式がある。巻線形誘導機の二次励磁を用いた風力発電システムは、可変速動作が可能であり、変動の少ない発電が可能である<sup>①</sup>。回転子が同期速度以下で動作している場合(次同期動作)は、二次側よりインバータを介してすべり分の電力を供給すれば、風車による機械的パワーを吸収して誘導発電することができる。回転子が同期速度以上で動作している場合(超同期動作)は、すべり分の電力を二次側よりインバータを介して系統に戻すことにより発電電力を一定に保つことができる。また、二次側制御であるためインバータの容量はすべり分がよく、損失・コストともに低減することができる。さらに、有効電力、無効電力の制御が可能であるため、力率1を維持できるため無効電力補償のための機器が不要となる。

このように、風力発電機の増加や大容量化に伴い、発電電力が安定し、且つ大容量機に向いている巻線形誘導発電機を用いた風力発電システムが増加すると考えられる。

そのため、本研究では二次励磁電圧を調整し、風速の変動に対して発電出力を一定に保つような制御方式を提案する。

また、出力変動の要因である風車回転数の変動に関しては風速が一定の場合でも風車の羽根とタワーとが交差することで速度が一時的に低下するタワーシャドウ効果の影響や巨大な複数の羽根の回転位置における風力の差により生ずるウィンドシェアによる回転数変動によって風車回転数の3倍に対応する周期を持つ成分、

その他多くのアンバランスに起因する風車回転数に対応する周期を持つ成分がある<sup>②</sup>。このような要因による風車回転数の変動により発電出力に変動を生じる。提案する発電機の制御方式は巻線形誘導発電機システムに固定子磁束上でのベクトル制御を適用したものであり、有効・無効電力の瞬時制御、風速変動の影響の抑制が可能であることを明らかにする。

さらに、以前の研究ではベクトル制御法の性能を確認するため二次励磁には指令値に対して理想的な交流電源としてサイクロコンバータを用いてきた。しかし、実用面を考慮するとインバータ駆動の二次励磁方式が広く用いられている。そのため、本研究ではインバータ駆動の二次励磁を用いたベクトル制御法についてシミュレーションを行い、その結果を報告する。

### 2. 風車特性

風車からのトルクで誘導発電機が回転して発電する。このとき、風車から得られるトルクは(1)式で表される<sup>③</sup>。

すなわち、ある風速で風車から得られるトルクを最大にするには誘導発電機の回転数に対して決定する。

このときトルクと回転数の関係を図1に示す。

ただし、 $R$  : 風車のブレード半径、 $\rho$  : 空気密度、 $A, B, C$  : 風車のブレードによって決まる係数、 $\lambda = R\omega/V_m$  : 周速比、 $\omega$  : 風車回転速度 とする。

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 (A\lambda^2 + B\lambda + C) V_m^3 \quad \dots\dots\dots(1)$$

そのため、風速変動によりトルクおよび出力も変動することになる。可変速運転制御においては誘導発電機の電磁トルクを調整して回転子のトルクと回転速度を変化させ変動分を回転エネルギーとして吸収することでこの変動分を抑えるように動作するものと見なすことも出来る。

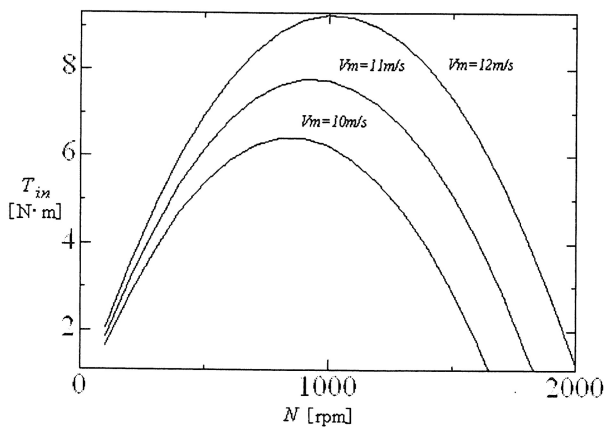


図1 風車特性

Fig.1 Characteristic of windmill

### 3. システム構成

本研究では巻線形誘導発電機の有効電力、無効電力の制御のためベクトル制御を用いる。本章では座標系とその制御システムについて説明する。

図2に本研究で用いた座標系を示す<sup>(4)(5)</sup>。固定子座標（静止座標）を $\alpha-\beta$ 座標，固定子鎖交磁束座標を $d-q$ 座標として計算するものとする。

また，図3にベクトル制御を用いた巻線形誘導機の制御ブロックを示す。有効電力および無効電力の指令値 $P_s^*$ 、 $Q_s^*$ を与えておき，固定子の電圧、電流の値より固定子に加わる有効電力と固定子に加わる有効電力と無効電力を計算して，その誤差をPI制御部に入力することで回転子に加える電圧の振幅 $v_{rd}$ 、 $v_{rq}$ を決定している。

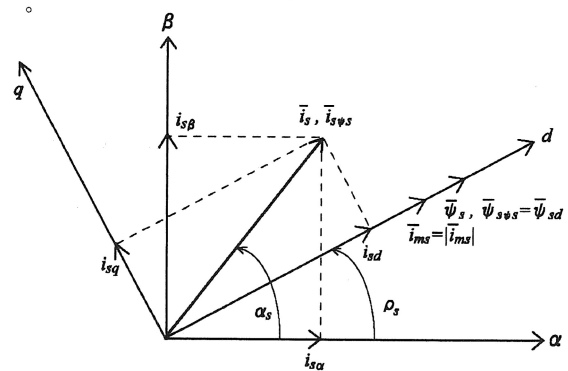


図2 静止座標系と固定子鎖交磁束座標系

Fig.2 Relationship between the stationary reference frame and stator flux oriented reference frame

なお，この計算で非干渉項<sup>(3)</sup>は以下の式で与えられる。

$$v_{rx} = (r_r + L'_r p) i_{rx} + \frac{L'_m}{L_s} p |\bar{i}_{ms}| - \omega_{sl} L'_r i_{ry} \dots \dots \dots (2)$$

$$v_{ry} = (r_r + L'_r p) i_{ry} + \omega_{sl} \frac{L'_m}{L_s} |\bar{i}_{ms}| + \omega_{sl} L'_r i_{rx} \dots \dots \dots (3)$$

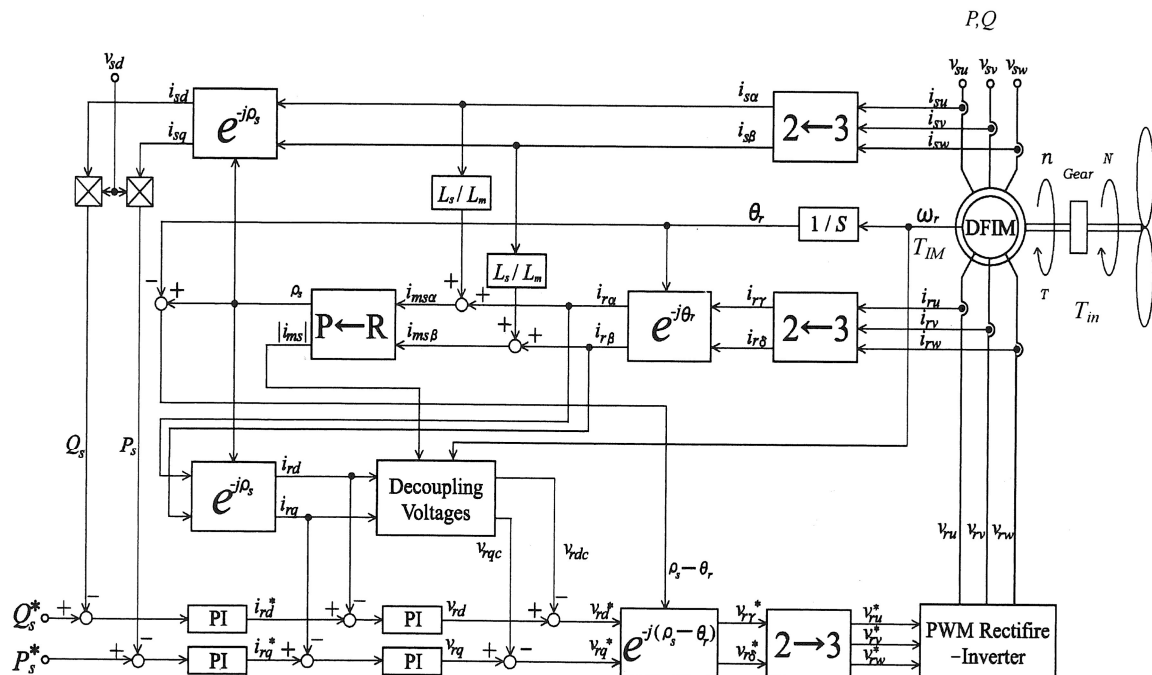


図3 システム構成

Fig.3 System Configuration

このとき、固定子磁束一定制御を行うため一次鎖交磁束成分の大きさ  $|\bar{i}_{ms}|$  は一定となる。  
さらに、干渉成分は

$$v_{rdc} = -\omega_{sl} L'_r i_{rq} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$v_{rqc} = \omega_{sl} \frac{L_m^2}{L_s} |\bar{i}_{ms}| + \omega_{sl} L'_r i_{rd} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。

この計算より決定する回転子電圧を二次励磁電圧として回転子電圧を加えることで発電電力の制御が可能となる<sup>(4)</sup>。

なお、本研究では PSIM を用いたシミュレーションで制御性能の確認をおこなっておりインバータはリニアアンプで模擬するものとする<sup>(6)</sup>。また、巻線形誘導発電機のシミュレーションに用いた定数は表 1 に示す。

表 1 巻線形誘導発電機の定数

Table 1 Parameters of induction generator

rated		machine parameters	
power	2kW	stator resistance	0.67 $\Omega$
pole	4	rotor resistance	0.66 $\Omega$
stator voltage	200V	stator leakage inductance	4.18mH
stator current	8.5A	rotor leakage inductance	4.18mH
rotor voltage	232V	magnetizing inductance	76.7mH
rotor current	5.18A	turn ratio	0.82
		moment of inertia	0.031kg·m <sup>2</sup>

#### 4. シミュレーション結果

ウィンドシェアとタワーシャドー効果による速度変動を模擬するため風速は正弦波として周期は 1 [s] とした。ベクトル制御を用いて二次励磁電圧を調整して、有効電力  $P_s$  と無効電力  $Q_s$  の制御をおこなう。なお、指令電力は  $P_s^* = -2000$  [W],  $Q_s^* = 0$  [var] とする。回転速度は誘導発電機の回転数  $n$  を表し、 $T_{in}$  は風車のトルク、 $T$  は軸トルクを  $T_m$  は誘導機の内部の電磁トルクを表している。

巻線形誘導発電機に風車からトルク  $T_{in}$  が加わるとそれに対応して軸トルク  $T$  が誘導発電機に加わり誘導発電機内の電磁トルク  $T$  を二次励磁電圧から調整して発電出力を指令電力と一致させる。さらに、回転数はトルクの変化に対して脈動するが電力は指令電力に一致してほとんど変動しない。図 4, 図 5 に二次励磁としてサイクロコンバータおよびインバータを用いたときの風速変動に伴う風車および発電機の各部の回転数, トルク, 電力を表示する。なお、シミュレーションに用いたソフト PSIM の回路図を図 6 に示すものとする。

#### 5. むすび

巻線形風力発電システムにおいてベクトル制御を用いた電力制御法を提案するとともにシミュレーション結果について報告した

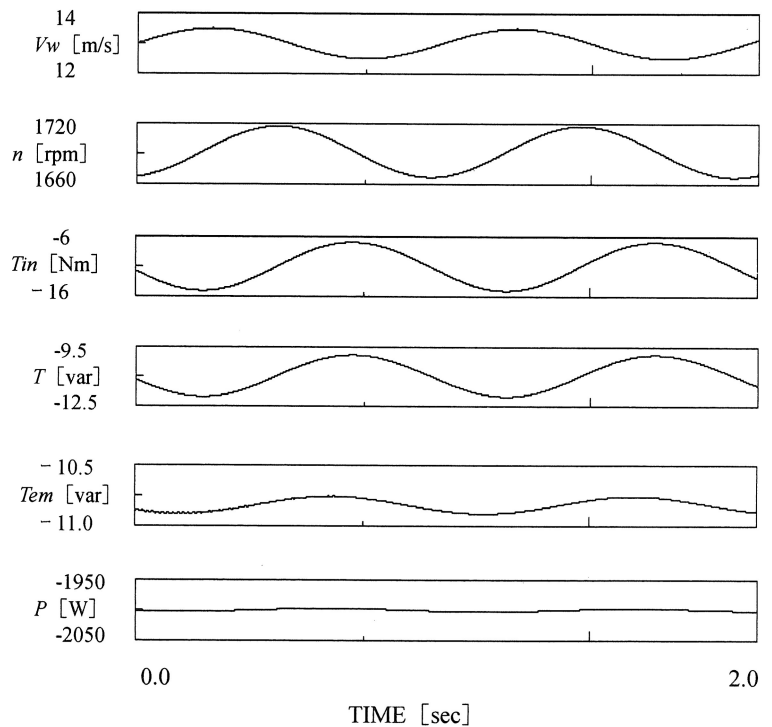


図 4 風速変動に対する誘導発電機の応答  
(サイクロコンバータ駆動二次励磁)

Fig.4 Response of induction generator to wind speed change  
(Cycloconverter driven secondary excitation)

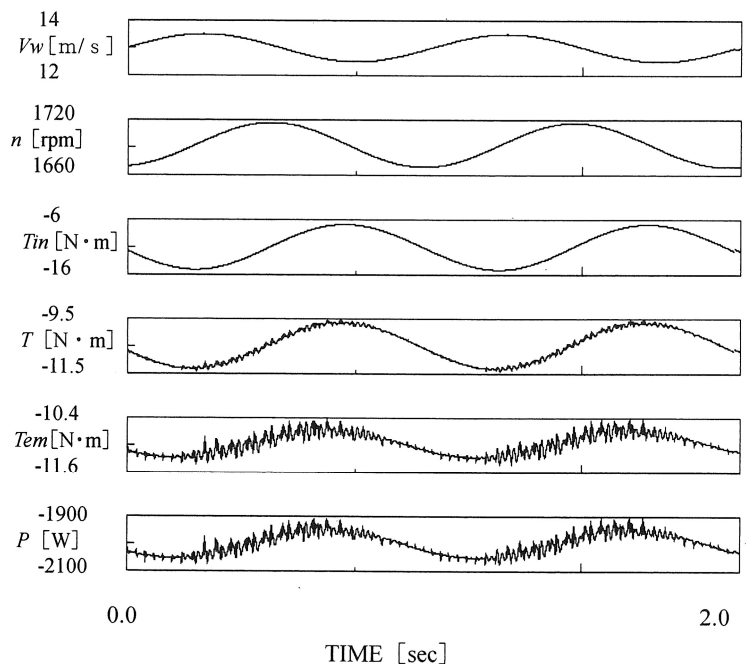


図 5 風速変動に対する誘導発電機の応答  
(インバータ駆動二次励磁)

Fig.5 Response of induction generator to wind speed change  
(Inverter driven secondary excitation)

この制御システムはウィンドシェアとタワーシャドー効果によるトルク変動や速度変動の影響を巻線形誘導発電機の二次励磁電圧を制御して電力変動が抑制できる制御法であることが確認された。さらに、二次励磁としてサイクロコンバータを用いた場合発電出力の指令値が $-2000$  [W] に対して偏差は $\pm 10$  [W] に抑えられている。しかし、インバータ駆動の二次励磁方式では同じ指令値に対して偏差が $\pm 50$  [W] の範囲で大となった。このことはベクトル制御の性能だけを確認するために用いたサイクロコンバータ駆動の二次励磁方式が理想的ではあるが、製品に用いられている変換器はインバータが多く今後インバータの影響を抑えるベクトル制御法が必要となる。なお、高調波の成分による影響が波形より観測されるが、これはフィルタを用いることで抑えることができるため、問題は低周波の脈動成分による脈動を抑えることが必要とされる。

### 参考文献

- (1) 牛山：風車工学入門，森北出版，pp.25-26, pp.157-159(2002)
- (2) 高田，片山，三宅，七原：「タービン空力トルク変動時の風力発電機の出力変動特性解析」，電学誌 B,124 巻 10 号, pp.1231-1239 (2004)
- (3) 牛山：風風力エネルギー読本，オーム社，pp.61-81(2005)
- (4) Arantxa Tapia, Gerardo Tapia J, Xabier Ostolaza, and Jose Ramon Saenz, "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator ", IEEE, Trans. on Energy Conv., Vol.18, No2, pp.194-204, June (2003)
- (5) 甲斐，田中，金田，小林，田中：「風力用巻線形誘導発電機のベクトル制御方式」，電学誌 B128 巻 1 号, pp.41-47(2008)
- (6) 篠原，山本，濱，栗原，宮川：「巻線形誘導発電機の制御法とタワーシャドー効果の抑制について」，平成 20 年電気学会全国大会，4-114 ,pp.191-192(2008)

(2009年10月9日 受理)



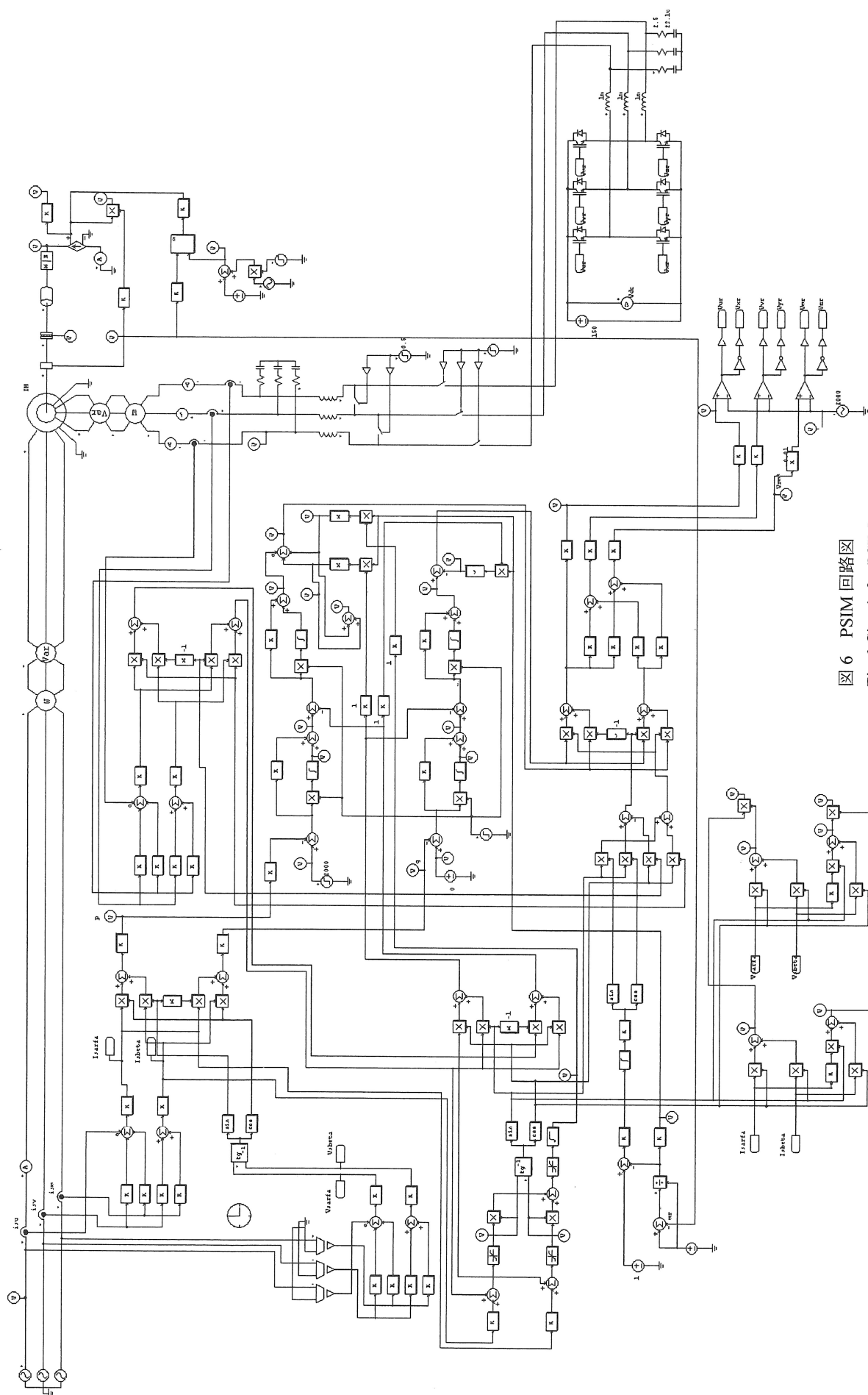


図 6 PSIM 回路図  
Fig.6 Circuit for PSIM