

二次励磁風力発電機モデルの構築

金尾 則一*

1. はじめに

地球温暖化防止・CO2 排出削減のため、国家レベルで再生可能エネルギーの導入が推進されており、風力発電や太陽光発電などの分散型電源が今後とも普及していくことが予想される。

これらの分散型電源の内、インバータを用いた分散型電源は、電力系統で瞬低が発生すると一斉停止し、電圧維持機能がないため電力系統の不安定現象を引き起こす恐れがある。この現象は、分散型電源の電力系統に占める割合が高まるほど大きくなる。これまで当所では電力系統に優しい分散型電源として、インバータ型電源には

- ・ 瞬低時の運転継続機能 (Fault Ride-Through ; FRT)
- ・ 瞬低時の電圧維持機能 (Dynamic Voltage Support ; DVS)

が重要であり、論文として発表してきた^{1)~3)}。

風力発電機は大別して、

- かご型誘導発電機方式
- 二次励磁誘導発電機方式
- 永久磁石同期発電機と組み合わせたフルコンバータ方式

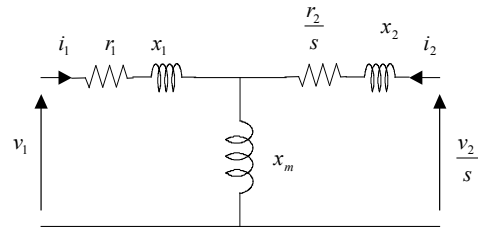
があるが、(b)または(c)の方式にはいずれもインバータが用いられており、自らの保護のため瞬低で停止する仕様となっている。特に、欧米では2006年11月のヨーロッパ大停電を契機に二次励磁風力発電機のFRT・DVSの技術開発に精力的に取り組まれており、多くの論文が発表されている。

ここでは、二次励磁風力発電機のFRT・DVS性能を検討するため、EMTPによる瞬時値解析モデルを構築したので、その概要を報告する。

2. 二次励磁風力発電機モデルの構築

(1) 二次励磁ベクトル制御

第1図に二次励磁誘導機の等価回路を示す。これより、電圧方程式をdq座標軸で表現すると次式となる^{4)~7)}。



- r_1 : 1次(電機子)抵抗
- x_1 : 1次(電機子)漏れリアクタンス
- r_2 : 2次(回転子)抵抗
- x_2 : 2次(回転子)漏れリアクタンス
- x_m : 励磁リアクタンス

第1図 二次励磁誘導機の等価回路

$$v_{1d} = r_1 i_{1d} + jx_1 i_{1q} + jx_m(i_{1d} + i_{2d}) = r_1 i_{1d} - x_1 i_{1q} - x_m(i_{1q} + i_{2q}) \dots (1)$$

$$v_{1q} = r_1 i_{1q} + jx_1 i_{1d} + jx_m(i_{1q} + i_{2q}) = r_1 i_{1q} + x_1 i_{1d} + x_m(i_{1d} + i_{2d}) \dots (2)$$

$$\frac{v_{2d}}{s} = \frac{r_2}{s} i_{2d} + jx_2 i_{2q} + jx_m(i_{1d} + i_{2d}) = \frac{r_2}{s} i_{2d} - x_2 i_{2q} - x_m(i_{1q} + i_{2q}) \dots (3)$$

$$\frac{v_{2q}}{s} = \frac{r_2}{s} i_{2q} + jx_2 i_{2d} + jx_m(i_{1q} + i_{2q}) = \frac{r_2}{s} i_{2q} + x_2 i_{2d} + x_m(i_{1d} + i_{2d}) \dots (4)$$

ここで、 $s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$: すべり、 ω_1 : 1次角周波数、

ω_2 : 2次回転角速度である。(1)~(4)式から x_m を消去すると、 v_{2d} 、 v_{2q} は次式となる。

$$v_{2d} = r_2 i_{2d} + s(v_{1d} + x_1 i_{1q} - r_1 i_{1d} - x_2 i_{2q}) \dots (5)$$

$$v_{2q} = r_2 i_{2q} + s(v_{1q} - x_1 i_{1d} - r_1 i_{1q} + x_2 i_{2d}) \dots (6)$$

ここで定常状態を考え抵抗分を無視し $v_{1d} = 1$ 、 $v_{1q} = 0$ となるように dq 軸を定義すると、 i_{1d} 、 i_{1q} は(1)、(2)式より次式となる。

$$i_{1d} = -\frac{x_m}{x_1 + x_m} i_{2d}, \quad i_{1q} = -\frac{v_{1d} + x_m i_{2q}}{x_1 + x_m} \dots (7)$$

p.u.表示による1次有効電力 P_1 、無効電力 Q_1 は、

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= v_{1d} i_{1d} + v_{1q} i_{1q} = v_{1d} i_{1d} \cong i_{1d} \\ Q_1 &= v_{1d} i_{1q} - v_{1q} i_{1d} = v_{1d} i_{1q} \cong i_{1q} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

であるから、(7)式から1次有効電力 P_1 は2次 d 軸電流 i_{2d} 、1次無効電力 Q_1 は2次 q 軸電流 i_{2q} によってそれぞれ独立に制御できることがわかる。

(2) 二次励磁風力発電機のパワーフロー

次に、二次励磁風力発電機のパワーフローを考える。風車の機械的軸入力 P_T 、1次有効電力 P_1 、2次有効電力 P_2 および1次から2次側への変換電

* 技術開発研究所 電力品質チーム

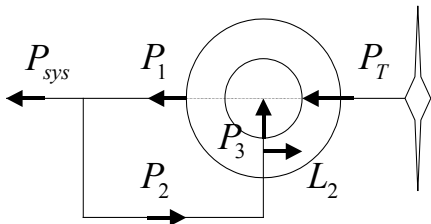
力 P_3 の関係 (第2図) は, 1 次銅損, 鉄損および風車の機械損を無視すると,

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_T + P_3 \\ P_T &= P_1 - P_3 = (1-s)P_1 \\ P_3 &= s \cdot P_1 = P_2 - L_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

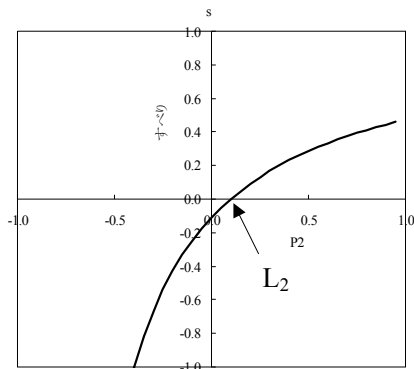
ここで L_2 : 二次銅損
の関係が成り立つから,

$$s = \frac{P_3}{P_1} = \frac{P_2 - L_2}{P_T + P_2 - L_2} \dots\dots\dots (10)$$

となる。すべり s と P_2 の関係 (但し P_T, L_2 一定と仮定) は第3図のようになる。



第2図 二次励磁発電のパワーフロー



第3図 P_2 とすべり s の関係

a. $P_2 > L_2$ の場合

$s = \frac{P_2 - L_2}{P_T + P_2 - L_2} > 0$ となり「非同期速度」で回転する二次励磁発電機となる。

b. $P_2 = L_2$ の場合

$s=0$ すなわち同期速度であり, 二次側に銅損分を注入すると直流励磁による同期発電機に相当する。

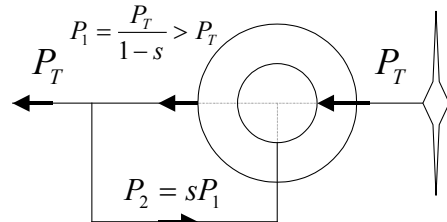
c. $P_2 = 0$ の場合

$s = \frac{-L_2}{P_T - L_2} < 0$ の二次側の入力がない場合であり, 通常の誘導発電機に相当する。

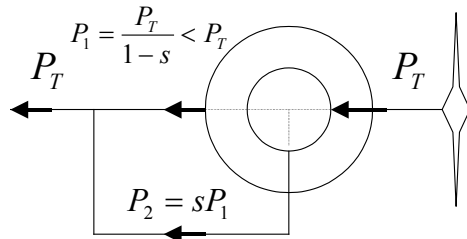
d. $P_2 < 0$ の場合:

$s < 0$ となり「超同期速度」で回転する二次励磁発電機となる。

以上より, 2 次有効電力 P_2 によって速度制御できることがわかる。直感的に理解しやすくするために, 2 次損失 L_2 を無視したパワーフローに書き直すと第4図となる。回転速度が非同期速度 ($s > 0$) の場合, P_1 は軸入力 P_T よりも大きくなり, 超同期速度 ($s < 0$) の場合, P_T は 1 次と 2 次を分流して流れることになる。



(a) 非同期速度 ($s > 0$)



(b) 超同期速度 ($s < 0$)

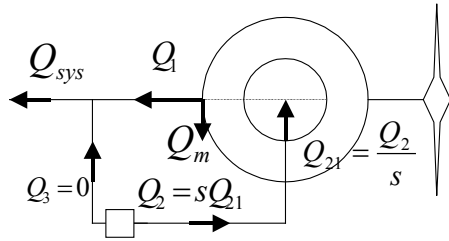
第4図 二次励磁風力発電機のパワーフロー ($L_2=0$)

次に無効電力フローを考える。誘導機の励磁無効電力を Q_m , 1 次無効電力を Q_1 , 2 次から 1 次への変換無効電力を Q_{21} , 2 次無効電力 Q_2 とすると (第5図で向きは遅れ無効電力を正として表現),

$$Q_1 = Q_{21} - Q_m, \quad Q_{21} = s \cdot Q_2 \dots\dots\dots (11)$$

となる。

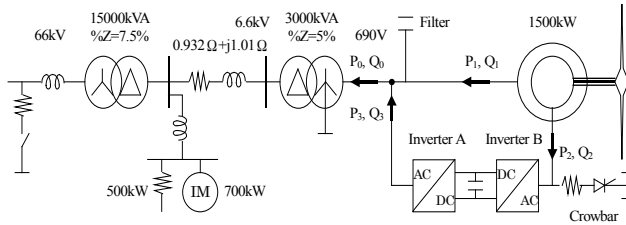
今, $Q_{21} = Q_m = sQ_2$ となるように 2 次側から無効電力を注入してやると $Q_1 = 0$ (力率 1) となる。無効電力の制御は周波数の低い 2 次側から制御する方が小さな無効電力で大きな無効電力を 1 次側から出力できるので効率が良い。極端な場合, すべり $s=0$ の場合は無限大の無効電力を 1 次側から供給できることになる。すなわち直流励磁する同期発電機は, 界磁電圧を制御することで大きな無効電力を出力できる。なお, $s < 0$ の場合, 回転子電圧・電流の相回転が逆になるため, 無効電力の計算の際, 符号が逆になることに留意する((11)式参照)。



第5図 二次励磁発電機の無効電力フロー

(3) EMTP 模擬

第6図に系統概要を示す。ATP-EMTPで作成したモデルの有用性を検討するため、文献4)と同じものを用いた。交流系統側の説明は省略しインバータと誘導機のモデリングを中心に説明する。



第6図 系統概要

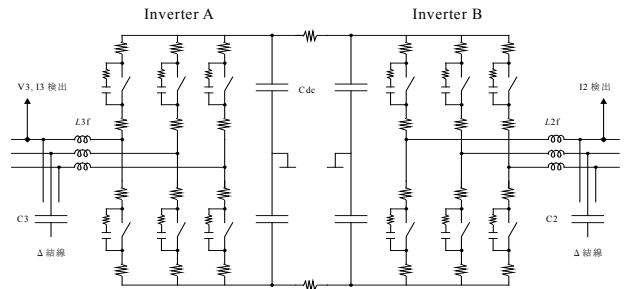
a. インバータの模擬

インバータを第7図のように模擬し、スイッチング素子には TACS controlled switch を用いた。還流ダイオードを付加する場合もあるが今回、直流電圧は常時交流電圧ピーク値よりも低下せずダイオードが動作することはないので省略している(省略した方が計算時間が短くて済む)。

switchの両端には微小抵抗を挿入する。これは、スイッチングに伴う数値振動を防止するためであり、また、EMTPでは一つのノードに1つのスイッチしかつけられないという制約があるためでもある。その抵抗値はスイッチングの電圧降下が約1Vとなるように選定する。EMTPであまりに小さな微小抵抗を挿入すると、そのままの値がコンダクタンス行列に入りその計算原理から逆行列計算に誤差を生ずる懸念があり、インダクタンスにすればその影響は小さくできると言われている⁹⁾。ただ、インダクタンスにするとスイッチ両端に過電圧が発生するので好ましくない。経験では0.001Ω程度であれば誤差の影響は小さかった。

次に、スイッチと並列にRCのスナバ回路を設ける^{10),11)}。これもスイッチングによる過電圧や振動

を防止するとともに、スイッチを多く含む回路でスイッチを開放すると分離された回路が発生し計算不能に陥ることを防止するためでもある。今回のシミュレーションではスナバ定数はATP-EMTPのベンチマークで採用されている値 $R=300\Omega$ 、 $C=0.05\mu F$ を選定した。なおこのスナバは数値スナバと呼ばれており、実際のスナバの値とは異なる。インバータ回路定数を第1表に示す。



第7図 インバータの模擬

第1表 インバータ回路定数

直流電圧	1500V
直流コンデンサ	50,000 μF
スナバ回路	300 Ω , 0.05 μF
キャリア周波数	10kHz
系統側インバータのフィルタ	$L_{3f}=0.5mH$ $C_{3f}=16\mu F$ (Δ結線)
回転子側インバータのフィルタ	$L_{2f}=0.2mH$ $C_{2f}=20\mu F$ (Δ結線)

b. 直流回路

直流回路は第7図のように直流電流を計測するため微小抵抗を挿入した。ここでも、微小抵抗を微小インダクタンスにするとスイッチングで過電圧が発生するので注意を要する。直流コンデンサは、この抵抗の両端に2つに分割して挿入した。

c. インバータ出力フィルタ

インバータの出力端には、スロープインダクタンス L_{2f} , L_{3f} とコンデンサ C_{2f} , C_{3f} (Δ結線) による1次フィルタを設置して電圧出力波形を正弦波にしている。

d. 二次励磁風力発電機

EMTPでは1つの系統に誘導機(非線形素子)を複数接続する場合、分布定数回路の線路で分割する必要がある⁸⁾。二次励磁の場合、1次側が既に系統に接続されているため、2次側には分布定数回路の線路を挿入する。あまりに小さな L , C の分布定数線路を挿入すると計算刻みを小さくしな

なければならないので注意を要する。ここでは、インバータBの出力フィルタに用いられているLを分布定数線路で模擬している。

誘導機の定数には第2表の値を用いた。機械系の模擬では、風車は模擬せず、出力一定となる機械トルクと慣性モーメントだけを模擬することとした。なお、慣性モーメントは文献では $2H=6s$ となっているが、今回のシミュレーションでは計算時間短縮のため $0.6s$ ($1.0E+8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$)とした。

第2表 誘導発電機定数

定格出力	1500kW(1750kVA: 1p.u.)
定格電圧, 定格周波数	690V, 50Hz
極数 p (同期速度)	6 (1000rpm)
固定子抵抗 R_s	0.006529 Ω (0.024p.u.)
回転子抵抗 R_r	0.004081 Ω (0.015p.u.)
固定子漏れインダクタンス	0.0433mH (0.05p.u.)
回転子漏れインダクタンス	0.0130mH (0.015p.u.)
励磁インダクタンス	2.078mH (2.4p.u.)
慣性定数($M=2H$)	0.6s (文献では 6s)

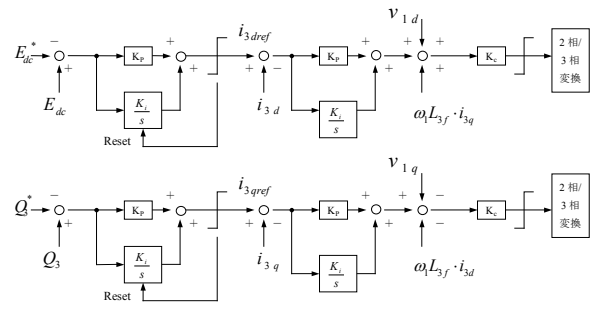
e. 制御ブロック

二次励磁の制御ブロック図を第8図に示す。系統側インバータAは「直流電圧一定制御」、回転子側インバータBは、前項のベクトル制御による「PQ制御」を行う。これらの制御はPWM制御で一般的に用いられている方式である。ここで、インバータAのDC-AVR, AQRの部分で i_{3dref} , i_{3qref} のリミッタで積分制御 (I制御) をリセットさせているのは、制御の即応性を高めるためである。また、有効電力, 無効電力, ゲイン K_c (制御率あるいは変調度) は次式による。用いた制御定数を第3表に示す。これらの定数は経験値でありカットアンドトライでチューニングしている¹⁰⁾。

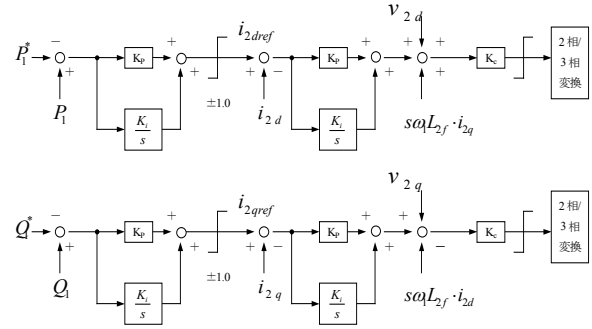
$$P = v_r i_r + v_s i_s + v_t i_t \dots\dots\dots (12)$$

$$Q = \frac{i_r(v_s - v_t) + i_s(v_t - v_r) + i_t(v_r - v_s)}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (13)$$

$$K_c = \frac{2\sqrt{2}V_{rms}}{\sqrt{3}E_{dc}} \dots\dots\dots (14)$$



(a) インバータ A



(b) インバータ B

第8図 制御ブロック図

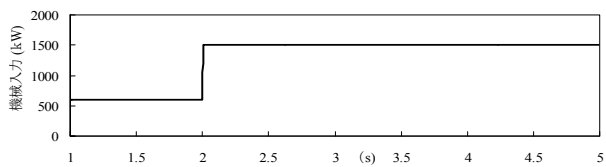
第3表 インバータ制御定数

系統側インバータ		回転子側インバータ	
DC-AVR	ACR(d軸)	APR	ACR(d軸)
$5 + \frac{200}{s}$	$3 + \frac{60}{s}$	$1 + \frac{30}{s}$	$1 + \frac{10}{s}$
AQR	ACR(q軸)	AQR	ACR(q軸)
$1 + \frac{20}{s}$	$3 + \frac{60}{s}$	$1 + \frac{30}{s}$	$1 + \frac{10}{s}$

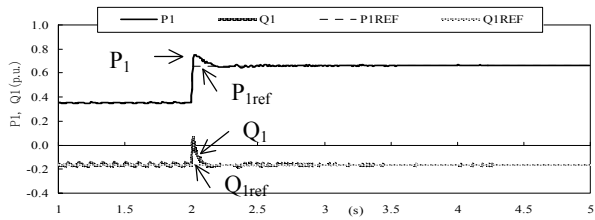
(4) シミュレーション結果

a. モデルの評価

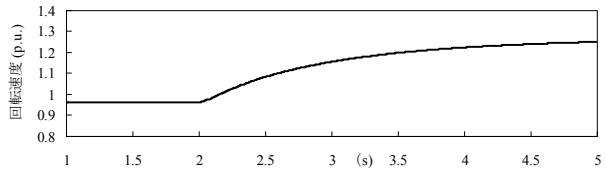
文献4)との対比により、作成したモデルの有用性を評価した。時刻 $t=2$ 秒で機械入力を600kWから1500kWに、あわせて P_{1ref} も630kW (0.36p.u.)から1150kW(0.657p.u.)に変化させたときのシミュレーション結果を第9図に示す。 Q_{1ref} は-290kVar (-0.166p.u.)一定としている。同図(b)に有効・無効電力の応答を示す。一次有効電力・無効電力は指令値どおりの応答を示し、独立に制御できているのがわかる。同図(c)に示す回転速度は、初期値0.952p.u.(=600kW/630kW) から 1.30p.u.(=1500kW/1150kW)へと変化し、また二次電流(同図(d))の相順も同期速度を境に正相回転から逆相回転へと変化している。今回の結果は文献4)と概ね一致した応答を示した。



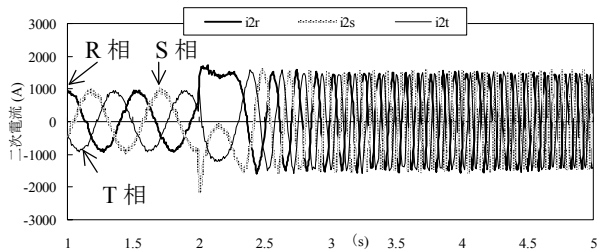
(a) 機械入力 (kW)



(b) 一次有効電力 P_1 , 無効電力 Q_1



(c) 回転速度



(d) 二次電流

第9図 モデルのインデシャル応答

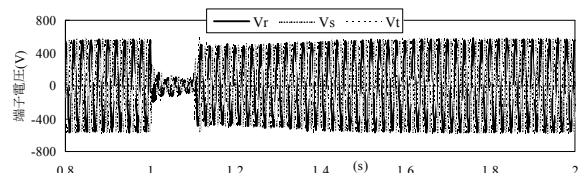
b. 瞬低時の応答

作成したモデルを用い、定格出力運転にて指令値を一定として、時刻 $t=1$ 秒にて 0.1 秒間の瞬低を与え、瞬低時の応答を調べた。結果を第10図に示す。二次電流には瞬低発生直後に一時的に約 4000A(peak)(これは定格電流 1500A(peak)の約 2.7 倍)の過電流が発生しており(図中の○),インバータは停止に至ると考えられる。

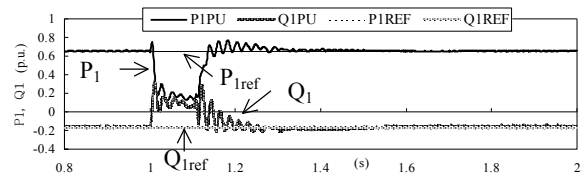
3. まとめ

ベクトル制御方式による二次励磁風力発電機の EMTP モデルを作成し、文献との比較によりモデルの有用性を検討した。そして瞬低時の応答を調べた結果、今回の制御方式では回転子側インバータには一時的に過電流が流れ、二次励磁風力発電機は停止に至ることがわかった。

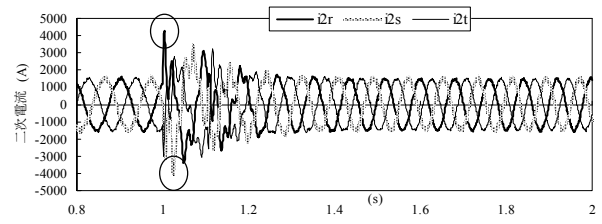
今後、構築したモデルをベースに二次励磁風力発電機の FRT・DVS性能を検討していく予定である¹²⁾。



(a) 端子電圧



(b) 一次有効電力 P_1 , 無効電力 Q_1



(c) 二次電流

第10図 瞬低時の応答(指令値一定)

参考文献

- 1) 上田智之, 駒見慎太郎:「分散型電源大量導入時における動的負荷を考慮した過渡安定度」, 電学論 B, 126, 10, pp.969-976 (2006-10)
- 2) 上田智之, 駒見慎太郎:「分散型電源大量導入時における動的負荷の安定性解析」, 電学論 B, 127, 2, pp.371-378 (2007-2)
- 3) 上田智之, 駒見慎太郎:「系統負荷の短時間電圧安定性を改善する分散型電源の動的電圧維持機能の実験的評価」, 電学論 B, Vol.128, No.5, pp.761-768 (2008)
- 4) 甲斐隆章他:「風力用巻線形誘導発電機のベクトル制御方式」, 電学論 B, Vol. 128, No. 1, 2008
- 5) 高橋理音他:「可変速発電機とその励磁制御系モデルの構築」, 電学論 B, Vol. 124, No. 2, 2004
- 6) 電気学会:「交流電動機可変速駆動の基礎と応用」, コロナ社, 1998
- 7) B. K. Bose: 「パワーエレクトロニクス&ACドライブ」, 電気書院, 1987
- 8) 日本 EMTP 委員会:「ATP Theory Book & Rule Book」, 2000. 4
- 9) 荒井純一:「インバータ制御分散電源の制御とモデリング」, 電気学会研究会資料 PE-08-12, PSE-08-21, SPC-08-43, 2008. 1
- 10) 電気学会技術報告:「パワーエレクトロニクス機器の制御技術」, 第1084号, 2007
- 11) 雨谷昭弘編著:「電力システムのパソコンシミュレーション」, オーム社
- 12) 金尾:「二次励磁風力発電機の動的電圧維持機能に関する検討」, H20年電気学会, B部門大会, No. 252. 2008