

XTAP 例題集		番 号	WP-02
例題名	DFIG 型風力発電システムのシミュレーション		
分 野	電力系統解析，系統連系，パワーエレクトロニクス		
文 献	<p>本例題作成に際し参考とした主な文献として，</p> <p>＜風力タービン部＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● GE Energy, “Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies”, April 16, 2010.</li> </ul> <p>＜主回路および制御部＞</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 甲斐隆章，田中裕二，金田裕敏，小林大地，田中昭雄：「風力用巻線形誘導発電機のベクトル制御方式」，電気学会論文誌 B, Vol.128, No.1, pp.41-47, 2008.</li> </ul> <p>そのほかの参考文献については本例題票の文末に記す。</p>		
概 要	<p>本例題は，大容量風力発電の一つとして普及している DFIG（Doubly Fed Induction Generator；二重給電誘導発電機）型風力発電システムの動作シミュレーションである。DFIG は同じ誘導機的一种であるかご形誘導機と異なり，風速に応じて最も効率の良い回転数で運転することが可能な可変速機であり，本例題でも風速が変化した場合の誘導機の回転数（すべり）の変化をシミュレーションしている。</p> <p>本例題で用いている DFIG 型風力発電システムのモデルは，発電システムの基礎部分となる誘導機と，回転子側変換器，固定子側変換器，直流コンデンサのみで構成された電気回路部と，二つの変換器の動作を制御する制御回路部，風の入力に対して回転数やブレードのピッチ角に応じた機械出力を得る風車部により構成されている。また各部位のモデルは基本的なモデルを用いることで全体としてわかりやすいシンプルな構成にしている。実在の風力発電システムの場合には系統連系規程により定められた各種機構や系統保護機能などが具備されるが，このモデルでは DFIG 型風力発電システムの基本的な応答をシミュレーションすることを目的としているため，実在の機器とは異なる部分があるため注意が必要である（特定の動作を再現したい場合には，それに必要な機構およびパラメータをモデルに組み込む必要がある）。</p>		

## 解析回路・解析条件

図 1 に、XTAP 上に模擬した電力系統と、そこに接続される DFIG 型風力発電システム（以降、DFIG と呼ぶ）の回路図を示す。系統周波数は 50 Hz である。

DFIG は定格容量 1.75 MVA、定格電圧が 690 V で、6600/690V の変圧器を介して高压配電系統に接続されている。また DFIG モデルは風速と無効電力指令値がそれぞれ制御信号として入力される。

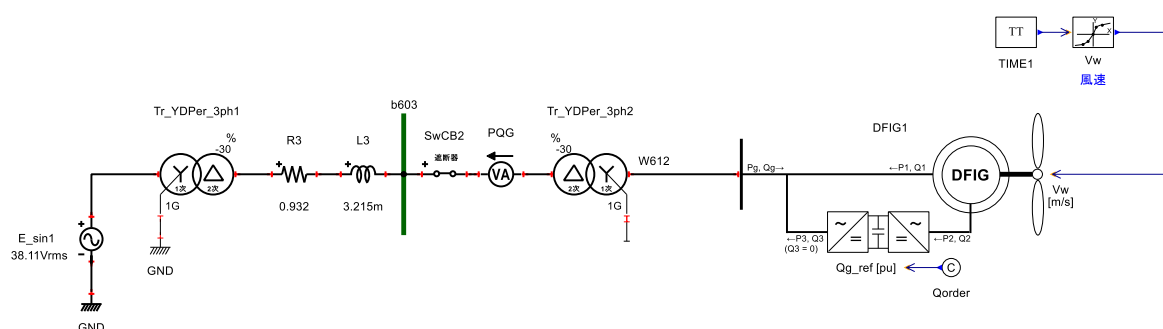


図 1 XTAP 上に模擬した電力系統とそこに接続される DFIG 型風力発電システム

図 2 に、DFIG の内部構成を示す。内部は大きく分けて主回路部、制御回路部、風車部の三つのパートにより構成される。外部の電力系統と接続される主回路部は、誘導機、フィルタ、回転子側変換器、固定子側変換器、二つの変換器を繋ぐ直流回路で構成される。制御回路部は主回路各部の電圧・電流信号を検出して  $dq$  変換や位相検出、有効・無効電力の演算を行う部分と、演算により得た諸量を用いて固定子側および回転子側の変換器の制御を行う部分により構成される。風車部は、風速の入力に対してそのときのピッチ角と回転数から機械出力を演算する空力特性演算部、ピッチ角を制御するピッチ角制御部、回転数制御を行う速度制御部により構成される。

主回路部の誘導機は、MAC-03 の例題でも用いられている文献 [1] で開発された誘導機相領域モデルを用いている。回転子側および固定子側の変換器は、本例題では半導体スイッチのオン・オフ動作を平均化したモデルを用いる。このため、変換器には出力指令値として三相の電圧信号を入力している。二つの変換器を接続する直流回路には直流コンデンサを並列接続し、また変換器と誘導機の間にはそれぞれ RLC フィルタを接続する。実機では、直流回路にブレーキングチョップや回転子側変換器と誘導機の上にクローバーなど、事故時に動作する保護回路が接続されている場合があるが、本例題では省略している。

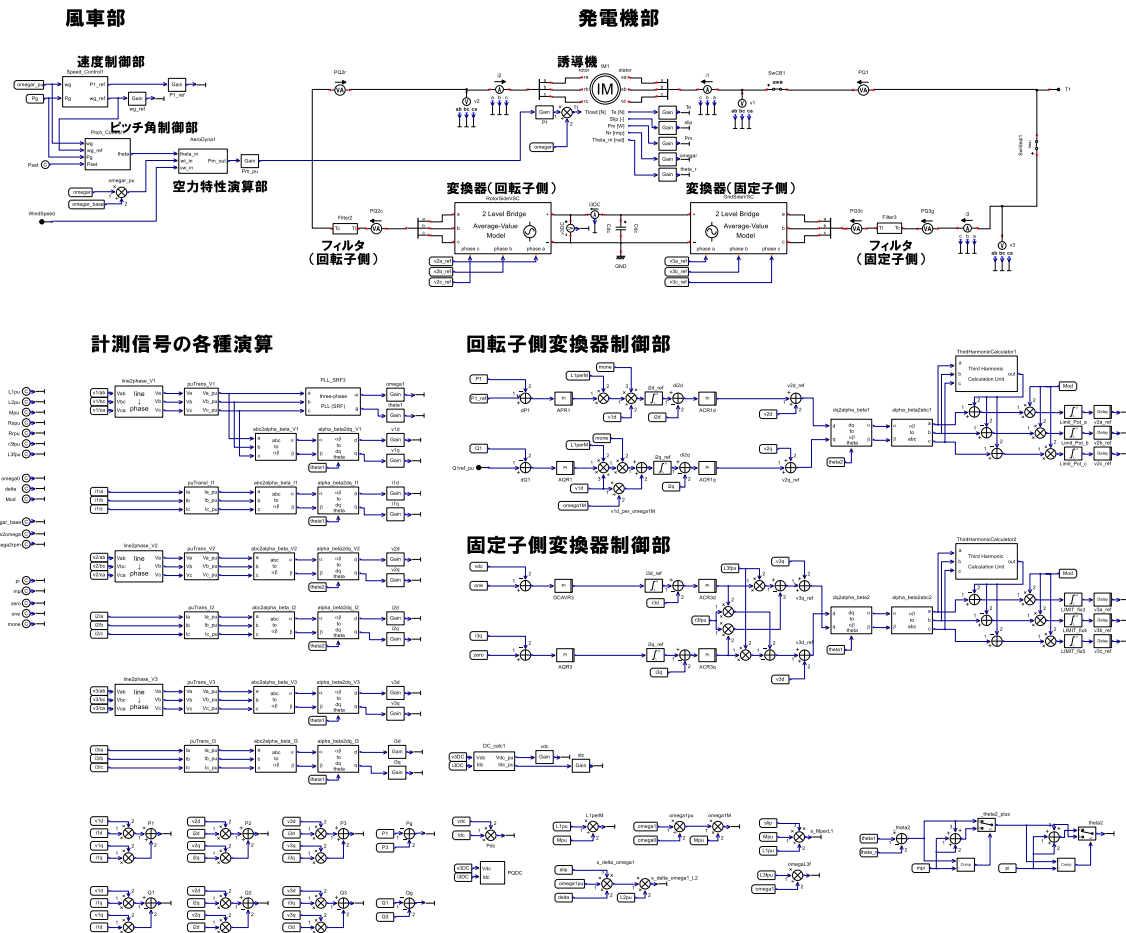


図2 DFIG型風力発電システムの内部構成

制御回路は文献 [2], [3] などを参考に、シンプルな PI 制御器を用いた  $dq$  変換に基づく電力制御 (APR, AQR) および電流制御 (ACR) により構成している。回転子側変換器は誘導機が固定子側から系統側へ出力する有効電力  $P_1$  および無効電力  $Q_1$  がそれぞれ一定値となるよう制御し、固定子側変換器は直流電圧および固定子側変換器が系統へ出力する無効電力がそれぞれ一定値（無効電力はこの例題では常に指令値としてゼロを設定）となるよう制御している。変換器の回路構成が平均化モデルであるため、PWM 制御などは行わず、制御の最終段で得られた各相の電圧指令値信号をそのまま変換器モデルに入力している。

風車部は、文献 [4], [5] などを参考に、空力特性演算部、ピッチ角制御部、速度制御部により構成される。トルクと回転数、機械出力の関係を表現する動力伝達系統（ドライブトレイン）の運動方程式演算部分は、誘導機モデルの内部で計算しているため、図 2 の階層では運動方程式部分を演算する部分はない。なおドライブトレインの演算では、風車タービン側の慣性モーメントと発電機側の慣性モーメントを別に扱い、それを結ぶ軸のねじれを考慮した方がより実機に近いモデルとなるが、本モデルでは簡単のためこれらは省略し、1 慣性のモデルとしている。

本例題では，風速 15 m/s で定格運転している状態で，図 3 に示すように風速を段階的に 4 m/s まで低下させた場合のシミュレーションを行う。本例題で用いるモデルは定常初期化に対応していないため，計算開始から約 7 s ほどかけて風車を定常状態にし，8 s のタイミングから風速を変化させる。

なお，本例題で用いた主回路や制御部，風車部の各種パラメータは，文献 [2] ～ [5] を参考に設定したものであり，必ずしも実際の風力発電システムとして適切なパラメータとなっていないと思われるが，以降の解析結果が示すように，DFIG 型風力発電システムの大まかな動特性は模擬できていると思われる。本モデルを改良して各種検討を行う場合には，各部のパラメータの設定等に注意されたい。

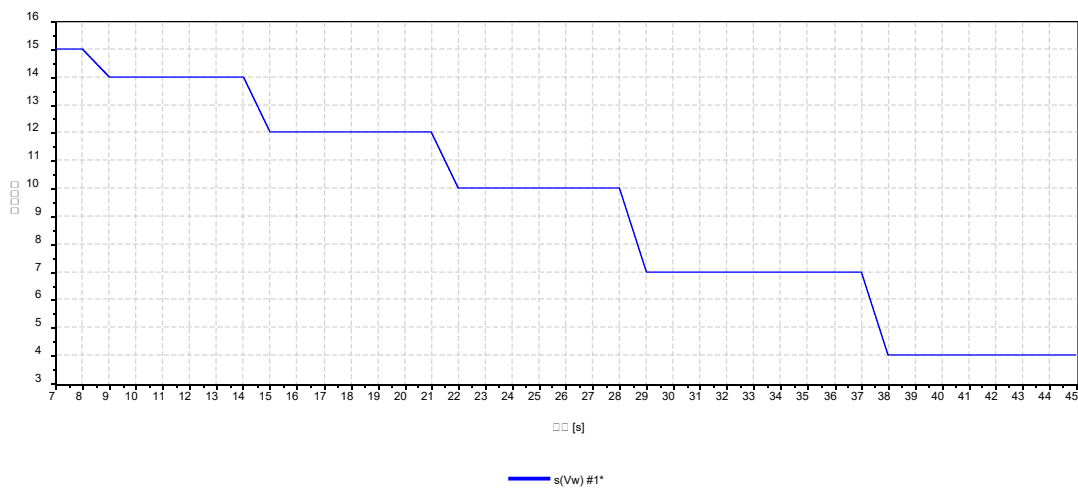


図 3 段階的に変化させる風速

## 解析結果

図 4 に、定常状態となった 7 s から 45 s までの、機械出力、ピッチ角、有効電力出力、無効電力出力、角速度、角速度指令値、すべり、回転子側変換器 APR, AQR, 固定子側変換器 DCAVR, AQR, 変換器の有効電力出力、無効電力出力、固定子電流、回転子電流の推移を示す。以降、風速の変化ごとにそれぞれの変化を考察する。

### 風速 15 m/s ⇒ 14 m/s ⇒ 12 m/s

風速が初期の 15 m/s から 14 m/s, 12 m/s と低下すると、機械出力もその瞬間は低下しているが、速やかにピッチ角を制御することで、機械出力を定格出力まで戻している。このため、有効電力出力や角速度などに変動は見られるものの、その後はほぼ一定値に落ち着いている。

### 風速 12 m/s ⇒ 10 m/s

風速が 10 m/s まで低下すると、ピッチ角による機械出力の制御が効かなくなり、その結果として機械出力が低下する。これに伴い、有効電力出力は低下し、角速度もわずかに低下する。すべりは初期の -0.16 程度からわずかに上昇（正側に変化）する。

### 風速 10 m/s ⇒ 7 m/s

風速が 7 m/s まで低下すると、引き続き機械出力が低下するが、速度制御部による角速度の制御が大きく動作し、その結果としてすべりは負から正に変化する。すなわち、これまでは同期速度を超える角速度（超同期速度）で運転していたが、同期速度を下回る速度となる。すべりは 0.1 程度まで緩やかに上昇する。また、すべりが負から正になるため、回転子電流は回転方向が変化する。実際に、30 s 付近において相順が逆転していることが確認できる。また変換器の有効電力出力を確認するとわかるように、すべりの極性の変化は変換器の電力の向きも変化させている。このため、DCAVR の出力も負から正に変化している。

### 風速 7 m/s ⇒ 4 m/s

風速が 4 m/s まで低下すると、これまでと同様に機械出力が低下し、そのほかの動きもそれ以前の動作と同様となる。すべりは 0.3 程度まで大きくなる。

以上の動作から、本モデルにおいて、誘導機のすべりが約  $-0.2 \sim 0.3$  まで変化し、可変速運転をしていることが確認できる。

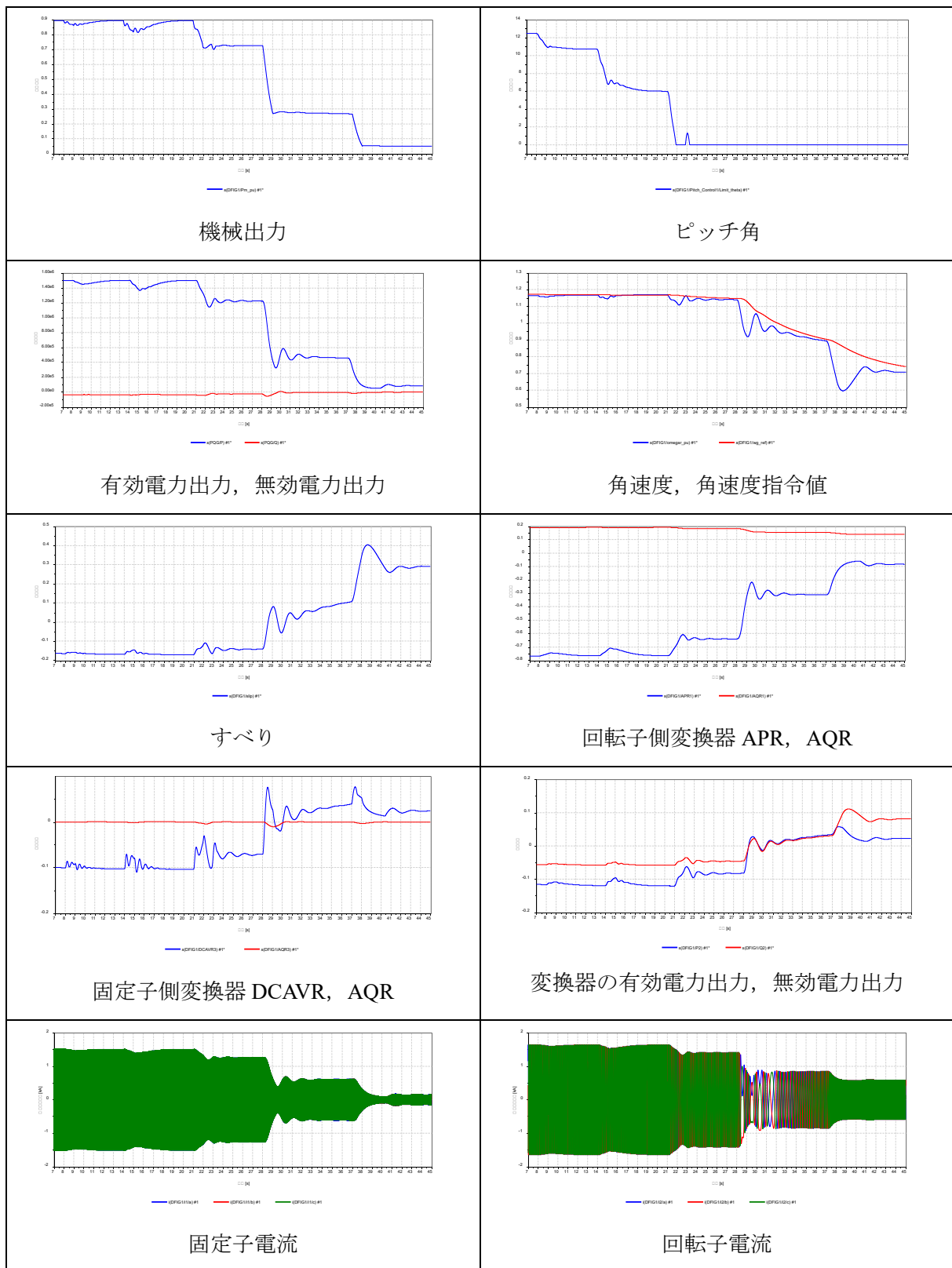


図4 解析結果

## 参考文献

本例題の作成にあたり参考とした文献は次の通り。

- [1] 米澤力道，川崎章司，「固定子および回転子巻線の磁気回路表現による誘導機の相領域モデルの提案」，電気学会論文誌 B，Vol. 143，No. 12，pp. 632-640，2023.
- [2] 甲斐隆章，田中裕二，金田裕敏，小林大地，田中昭雄：「風力用巻線形誘導発電機のベクトル制御方式」，電気学会論文誌 B，Vol.128，No.1，pp.41-47，2008.
- [3] 七原俊也，『風力発電とその電力システムへの連系』，コロナ社，2020 年.
- [4] [https://www.esig.energy/wiki-main-page/wt3-generic-wind-model/#Turbine\\_Model\\_.28WT3T.29](https://www.esig.energy/wiki-main-page/wt3-generic-wind-model/#Turbine_Model_.28WT3T.29)  
(アクセス日：2024 年 10 月 1 日)
- [5] GE Energy, “Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies”, April 16, 2010.

更 新 履 歴		
日 付	例題ファイル バージョン	変 更 内 容
2024/10/16	1.0	初版作成（XTAP Version 3.51 用）