

風力発電のFRT・DVSに関する研究

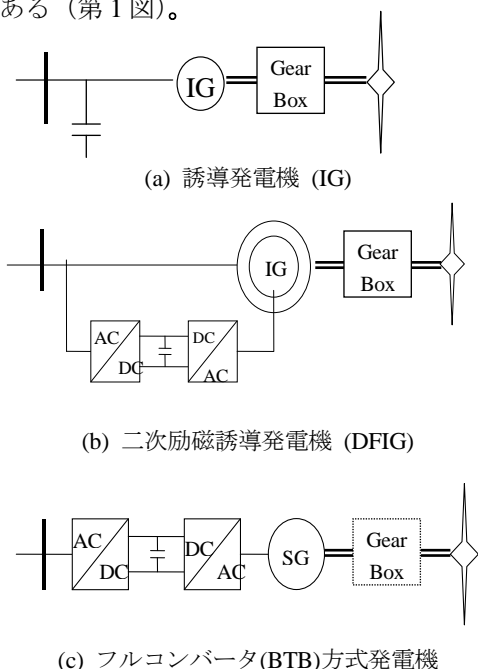
金尾 則一*1

1. はじめに

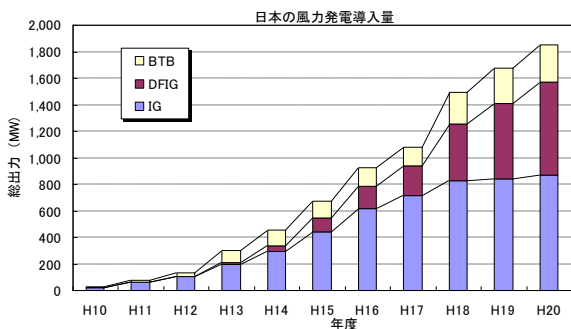
地球温暖化防止・CO₂ 排出削減のため、国家レベルで再生可能エネルギーの導入が推進されており、風力発電や太陽光発電などの分散型電源が今後とも普及していくことが予想される。風力発電機は大別して、

- (a) かご型誘導発電機方式 (IG)
- (b) 二次励磁誘導発電機方式 (DFIG)
- (c) 発電機と組み合わせたフルコンバータ方式 (BTB)

がある (第1図)。



第1図 風力発電の連系方式



第2図 日本の風力発電導入量

第2図はこの分類別に国内の風力発電導入量

(単機出力 10kW 以上) の推移を示す。これは NEDO で公表されている資料から筆者が分析したものである。H20 年度末で約 180 万 kW の風力発電機が設置されてきており、その内、DFIG が約半分を占めるに至っている。

これらの風力発電の内、インバータを用いた DFIG, BTB の方式は、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)
- ・ 瞬低時の電圧回復支援機能 (Dynamic Voltage Support ; DVS)

が重要であり、論文として発表してきた^{(1)~(3)}。特に、欧米では 2006 年 11 月のヨーロッパ大停電を契機に DFIG 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、風力発電機の上記連系方式の違いによる FRT・DVS 性能を評価するため、EMTP による瞬時値解析モデルを作成し検討したので、その概要を報告する。

2. 風力発電の連系方式

(1) 連系方式の得失

a. 誘導発電機方式 (IG)

この方式は、一般的に誘導発電機を系統に直に接続する方式で、系統から常に無効電力を消費するタイプである。このため補償用コンデンサや SVC を採用して FRT・DVS 機能付きと呼んでいる場合がある。また、単機容量が大きくなると起動時の電圧変動が大きくなることからソフトスタータとしてサイリスタ起動を採用している。

b. 二次励磁誘導発電機 (DFIG)

この方式は巻線型誘導発電機の回転子側を励磁して可変速制御を行うもので、固定子は系統に直接接続され、回転子は AC-DC-AC コンバータを介して系統に接続される。コンバータ容量は発電

*1 技術開発研究所 電力品質チーム

機定格容量の 30%程度 (従って可変速運転範囲も 30%) と小さくて済む。

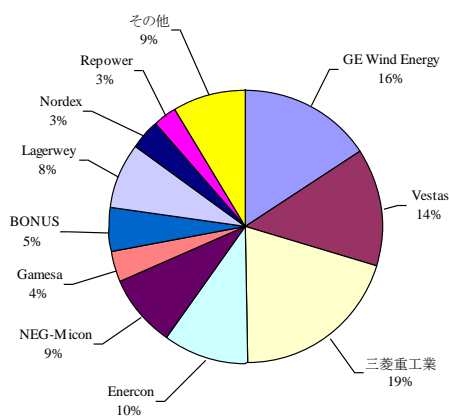
c. フルコンバータ方式 (BTB)

この方式は、発電機出力全量を AC-DC-AC 変換して系統と接続するものであり、DFIG に比べ回転速度変化幅は大きく変えることができる。直流部に DC-DC コンバータを介して蓄電池を設置することで、風力出力の平滑化などが可能であり、また、系統側のコンバータで無効電力補償が可能である。接続する発電機には誘導発電機や永久磁石同期発電機があり、増速機は省略できる場合がある。BTB 方式は、変換器を介するため損失が大きく、コスト高ではあるが、可変速運転範囲が大きく採れ、出力調整も容易に行えることから、大容量化にも適しており、今後の風力発電として期待できる。

(2) 各風車メーカーの連系方式の採用事例

第 3 図は平成 20 年度末における風車メーカー別の国内導入比率(合計出力ベース)である。GE Wind Energy (US), Vestas (Denmark), 三菱重工業(日本), Enercon (Dutch), NEG-Micon (Denmark)などが採用されている。

各メーカーの連系方式に調べた結果を第 1 表に示す。Vestas (DK), MEG-Micon (DK)や三菱重工は主に IG 方式を、GE Wind Energy (US), Gamesa (GE), Vestas (DK)や Repower (GE)は DFIG 方式を、そして Enercon (GE), Lagerwey (NL)は BTB 方式を採用している。



第 3 図 わが国における風車メーカーのシェア (H20 年度)

第 1 表 風車メーカーの方式

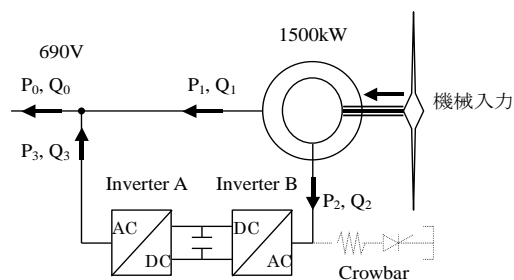
	～1MW	1～2MW	2MW～
IG 方式	Vestas MEG-Micon Nordex Vestas(V47-660) 三菱重工	BONUS (Siemens) Fuhlraender MEG-Micon 三菱重工	BONUS (Siemens)
DFIG 方式	Dewind Gamesa Vestas(V52-850)	Nordex Dewind(D6-1250) GE Wind Energy TACKE	Ecotechnica Gamesa(G80-2) Repower(MM82) Nordex(N90) TACKE Vestas(V80-2.0)
BTB 方式	Enercon	Enercon Lagerwey	Dewind (D8.2-2MW)

3. DFIG・BTB 方式のモデリング

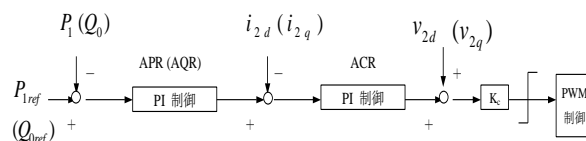
風力発電の FRT・DVS を評価するため、DFIG・BTB の各モデル、FRT・DVS 制御そして安定に運転するための正相電圧検出について述べる。

(1) DFIG モデル

第 4 図に DFIG の構成を示す。DFIG では瞬低時にインバータ B に流れる過電流や直流過電圧を防止するため、二次側を抵抗短絡させるクローバ回路を設ける場合がある。これにより FRT 機能は実現できるが、DVS 機能は実現できない。DFIG 方式の FRT・DVS 機能を検討するため、ATP-EMTP を用いてモデル化した^{(4)~(12)}。用いた制御方式は一般的な d, q 軸によるベクトル制御である。系統側インバータ A は直流電圧一定制御、力率 1 制御を行い、回転子側インバータ B で固定子側の有効電力、無効電力制御を行う。



(a) DFIG の構成

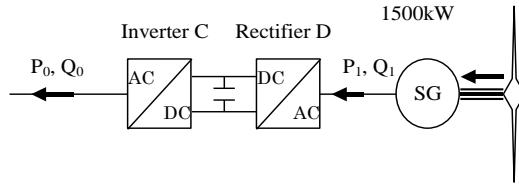


(b) 回転子側インバータ B の PQ 制御

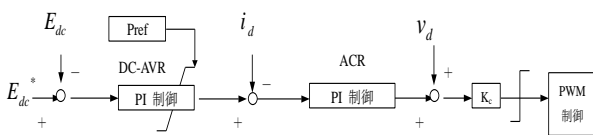
第 4 図 DFIG の構成

(2) BTB モデル

第5図にBTBの構成を示す。本モデルでは発電機には同期発電機を用い、発電機側の変換器には整流器を採用した。系統側インバータCではDFIGのインバータAと同様、直流電圧一定の制御を行っている。



(a) BTB の構成



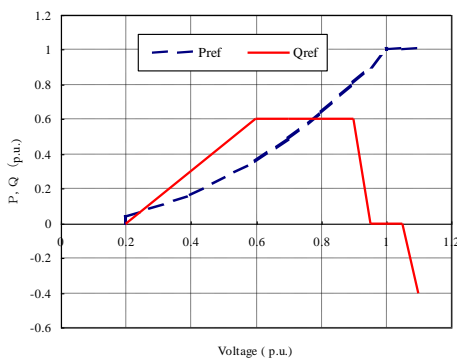
(b) 系統側インバータCのP制御

第5図 BTBの構成

(3) FRT・DVSの制御

DFIGのDVS制御は、海外の論文等では系統側のインバータAで行っているが、本稿ではDVS制御として第6図に示すようなPQ指令値(Pref, Qref)を端子電圧の関数としてインバータBに与えている。なお、端子電圧が0.2p.u.以下の場合には位相検出が難しくなることからインバータの出力を停止させている。

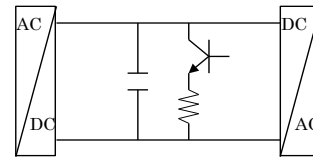
一方、BTBのDVS制御では、P制御は指令値を系統側インバータCのDC-AVRリミッタに与えることとし、Q制御はDFIGと同様の制御とした。



第6図 瞬低時のPref, Qref

また、DFIGやBTBでは、系統故障時には有効電力が系統に流れないため直流電圧の上昇が課題となる。その対策として直流電圧上昇時、直流回路を抵抗短絡させる回路を付加し、定格直流電圧

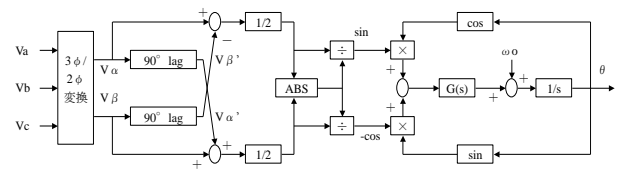
の150%になると約0.07秒間スイッチをオンさせている。第7図にその回路図を示す。



第7図 直流過電圧に対する保護回路

(4) 正相電圧の検出

実際の系統故障の大部分は不平衡故障であり逆相成分が含まれるため、電圧実効値や有効電力、無効電力には系統周波数の2倍の周波数成分が含まれ、インバータにとって安定な制御ができず過電流が発生する恐れがある。このため、不平衡故障などの擾乱に強い電圧検出や有効・無効電力検出が必要となる。今回採用した電圧検出回路を第8図に示す⁽¹³⁾。



第8図 不平衡電圧に強い電圧位相検出回路

一般に用いられているV, P, Qの演算は、三相の電圧・電流瞬時値を三相二相変換し(1)~(3)式、

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ i_s \\ i_t \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

これより有効・無効電力P, Qは、

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

または、

$$P = v_r i_r + v_s i_s + v_t i_t \dots\dots\dots (5)$$

$$Q = \frac{i_r(v_s - v_t) + i_s(v_t - v_r) + i_t(v_r - v_s)}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (6)$$

で求めることができる。このままでは不平衡故障時に逆相成分が含まれるため、P, Q, Vは120Hzの振動波形となる。インバータを安定に制御するためには正相成分を抽出する必要がある。

V_α , V_β の正相成分は,

$$V_{\alpha p} = \frac{1}{2}(V_\alpha - V'_\beta), \quad V_{\beta p} = \frac{1}{2}(V_\beta + V'_\alpha) \dots\dots (7)$$

ここで,

V'_α : V_α より 90 度遅れの値

V'_β : V_β より 90 度遅れの値

より求めることができる。

同様に、 I_α , I_β の正相成分は

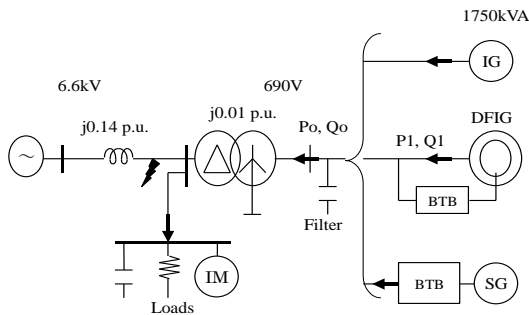
$$I_{\alpha p} = \frac{1}{2}(I_\alpha - I'_\beta), \quad I_{\beta p} = \frac{1}{2}(I_\beta + I'_\alpha) \dots\dots\dots (8)$$

となる。これより、有効電力、無効電力の正相成分は(4)式で各電圧・電流を正相成分のものに置き換えて求めることができる。なお、 V, I に p.u. 値を用いた場合の P, Q 演算((4)式)では $3/2$ の係数は不要となる。

4. モデルによる風力発電の連系方式の評価

(1) 単純なモデル系統での評価

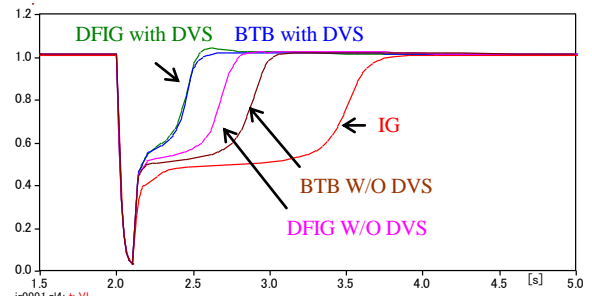
第 9 図に示した単純なモデル系統を対象に、IG, DFIG, BTB の FRT・DVS 機能のシミュレーションを行った。対象系統は、風力発電機が系統の末端に接続される場合が多いことから比較的弱い系統とし、更に風力発電の近傍に抵抗負荷(2.2MW)と誘導機負荷(2.2MW)を接続して、瞬低時の電圧回復が遅い系統とした。なお、系統故障は発電所の至近端で発生させた。



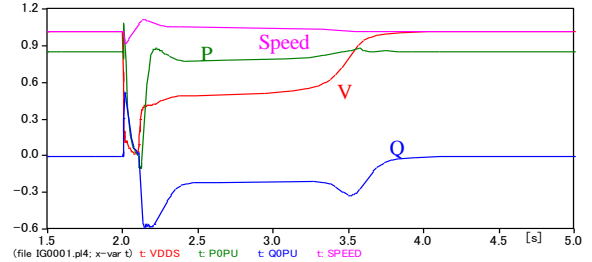
第 9 図 検討に用いた系統構成

a. FRT・DVS 機能の評価

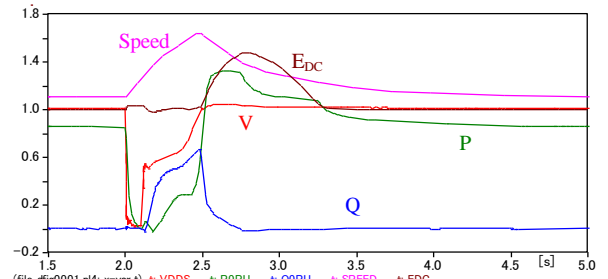
平衡故障(三相短絡)にて、FRT・DVS 機能の効果を検討した結果を第 10 図に示す。IG では故障復帰後、電圧回復に時間がかかるのに対し、DFIG, BTB では DVS 機能があると電圧回復が速くなっており DVS 機能の効果が確認できた。なお、DVS 機能が無い場合には、DFIG の方が BTB に比べて電圧回復が速いのは、DFIG 内部の磁束



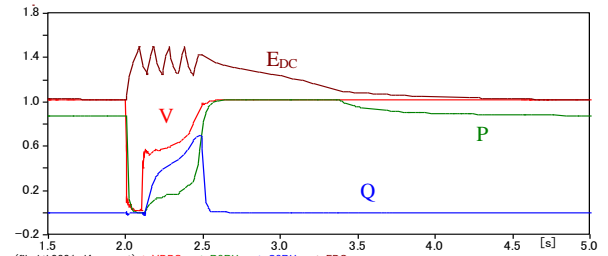
(a) 負荷端電圧



(b) IG の発電機端子電圧, 有効・無効電力, 回転数



(c) DFIG の発電機端子電圧, 有効・無効電力, 回転数, 直流電圧 (3LS with DVS)



(d) BTB の発電機端子電圧, 有効・無効電力, 回転数, 直流電圧 (3LS with DVS)

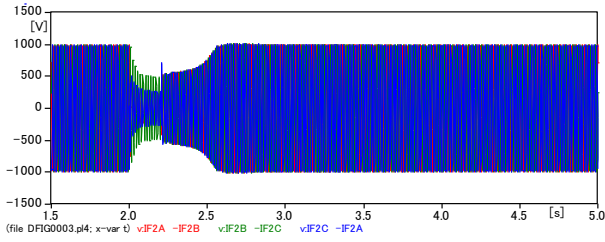
第 10 図 IG, DFIG, BTB の瞬低応答 (3LS)

による起電力があるためと考えられる⁽¹⁵⁾。

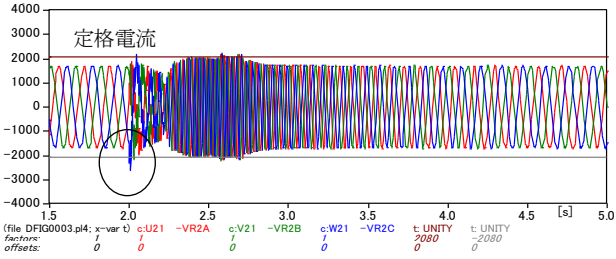
b. FRT・DVS 制御の安定性検討

FRT・DVS 制御の安定性を検討するため、不平衡故障(R-S 短絡)に対する DFIG, BTB 方式の応答を過電流の面から検討した。まず DFIG の結果を第 11 図に示す。回転子側インバータには故障発生直後に定格電流を若干超過しているが、過電流耐量の範囲であり、運転継続は可能である。

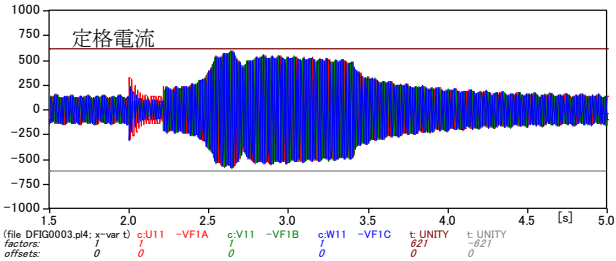
次に、BTB の結果を第 12 図に示す。DFIG の場合と同様、系統故障発生直後に定格電流を若干超



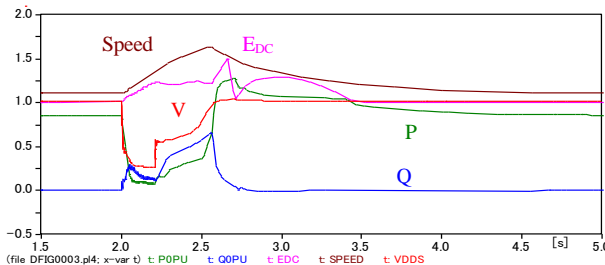
(a) DFIG の端子電圧波形



(b) DFIG の回転側インバータの電流波形



(c) DFIG の系統側インバータの電流波形



(d) DFIG の P, Q, V, EDC, Speed

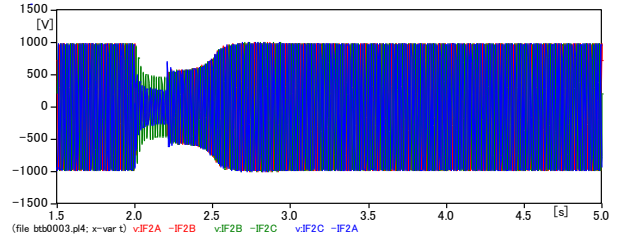
第 11 図 DFIG の瞬低応答 (2LS)

過しているが、過電流耐量を大きくすることにより運転継続は可能と考えられる。

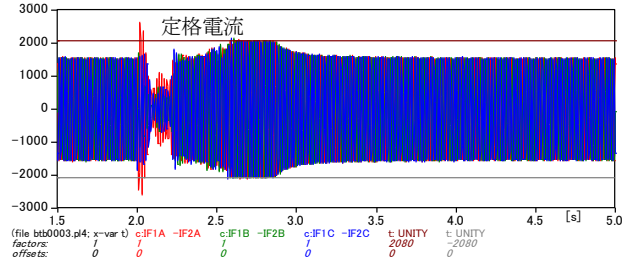
(2) ドイツのグリッドコードへの適用可否の検討

第 13 図は E. ON. Netz のグリッドコードの一例で、電圧低下時の運転条件を示す。Type1, Type2 の線より上の部分の電圧低下では運転を継続することが求められている。ただ、Type2 (limit line2)では上の部分の電圧低下でも条件によって解列が認められる場合がある。ここでは Type1 と Type2 (limit line2)のケースを DFIG に適用し FRT・DVS を検討した結果を第 14 図に示す。

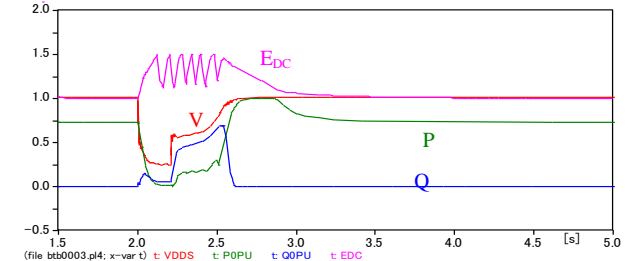
Type1, 2 いずれの場合も電圧が低い領域では無効電力を出力し、二次側電流に過電流は発生していないことから、FRT・DVS が実現されているこ



(a) BTB の端子電圧波形

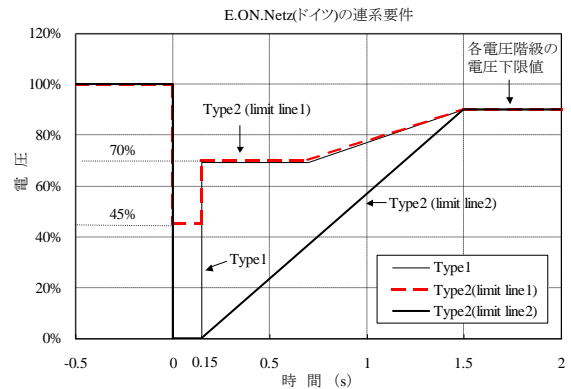


(b) BTB の系統側インバータの電流波形



(c) BTB の P, Q, V, EDC

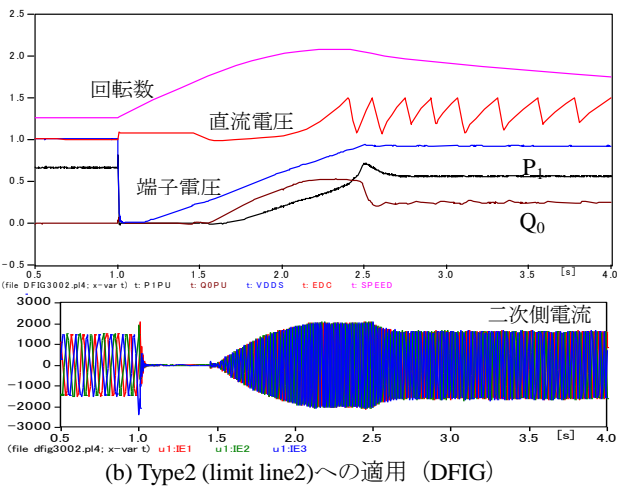
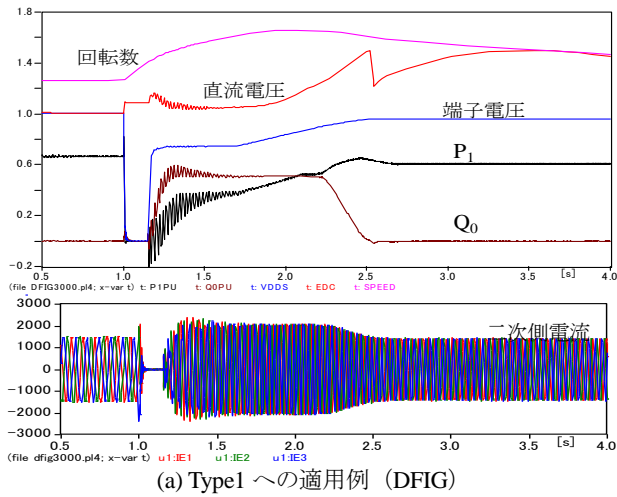
第 12 図 BTB の瞬低応答 (2LS)



第 13 図 E. ON. Netz のグリッドコード

とがわかる。

但し、いずれの場合も端子電圧が 1p.u.まで回復していない間、DFIG の有効電力出力が制限され直流電圧、回転数とも上昇しており、これらの点で運転継続が制約を受ける可能性がある。なお、直流過電圧保護回路（直流過電圧 1.5p.u.）を付加しているため、Type1 では 2.5 秒あたりで直流電圧が低下し、Type2 では 2.4 秒あたりから直流電圧がジグザグ状に変化している。Type2(limit line2)のケースでは電圧低下の時間が Type 1 に比べ長いので、ピッチ角制御などにより風力の機械入力を制



第14図 E.ON. Netzのグリッドコードへの適用例

限するか、または直流部に蓄電池を設けることにより運転継続は可能と考えられる。

5. まとめ

風力発電機の FRT・DVS 機能による系統連系への影響を評価するため、ATP-EMTP を用いて DFIG、BTB 解析モデルを作成し、FRT・DVS の実現可能性を検討した。結果、DFIG、BTB 方式での FRT・DVS 機能を実現するには、不平衡故障に強い電圧位相検出が有効である。

作成した解析モデルを用いて連系方式の違いによる FRT・DVS の評価を行った結果、IG 方式は電圧回復が遅いのに対し、DFIG、BTB 方式は DVS 機能があると電圧回復が速く、電力系統の安定性に寄与する。特に、風力発電機が大容量化してくると IG 方式では系統故障時の電圧回復が遅いため別途 SVC が必要となることが考えられるので、無効電力を供給できる DFIG や BTB 方式の方が優れていると言える。

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) 金尾則一:「二次励磁風力発電機モデルの構築」, 北陸電力, 技術開発年報, 第 43 号, pp.33-37, 平成 21 年 1 月
- (13) 赤松雅彦, 塚田路治, 伊藤大輔:「電力系統事故時の異常電圧に対処した PLL および周波数検出方式」, 電学論 B, No.118 巻 9 号, 平成 10 年, PP955-961
- (14) 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
- (15) 金尾:「風力発電機の FRT・DVS に関する一検討」, H21 年電気学会, B 部門大会, No. 252. 2008