

1 1. RE 大量普及のための戦略

カーボンフリー電力は可能か？

RE 大量普及のための最大の条件は経済性であることは間違いのないでしょうが、そのほかの条件の中では、既存の電力システムにどう上手く融合していくかという方法論が大きいと思います。経済性が良くても信頼性が低くでは困ります。最初に、火力を全廃したカーボンフリー電力は実現可能か、予め見当をつけておくことが効果的だと思います。

火力は重要な使命を 2 つ担っています。第 1 は予備力です。部分負荷で運転している状態から発動される瞬動予備力から暖機で停止している待機予備まで多様な分類がなされますが、日電力量に合わせて供給電力量を自在に制御できるのは火力を措いて他にありません。これを蓄電池で代替しようとする膨大な量と投資になります。他方、給電運用能力向上でカバーできる部分が相当あります。

第 2 は電圧支持です。火力は需要近傍に立地できるので、系統および負荷の電圧を支持する主体になっています。それが全部停止したのでは、いくら RE に DVS 機能を付与したとしても、系統全体の電圧支持能力は格段に減退するでしょう。その結果がどうなるか、どういう対応策があるかが本章の主題です。もし系統の電圧支持能力が不足するなら、膨大な量の SVC などの電圧支持用の補助手段が必要になります。

電圧支持に関する心配は、どのくらいのものでしょうか。それを見極めるには現実の系統において火力を全部停止し、不足分を原子力、RE、蓄電池でまかなって、需給バランスが取れる状態にして、系統電圧支持能力がどうなるかを見ればよいでしょう。以下に問題のありそうなカーボンフリー電力系統 4 例について検討してみます。

【カーボンフリー電力系統 1】 この系統の構造を図 9.1 に示します。新規原子力 G9 と G10 を追加し、石炭火力 G4 を廃止します。蓄電池 B1 と B2 が需給バランスのために必要になります。RE と蓄電池は全て DVS 機能を有するものと仮定します。潮流を見る限りネットワークの増強は特に必要ありません。発電機 G6 は小水力と大型石炭火力の総合です。大型石炭火力は廃止になりますが、電圧支持のため、発電機だけは同期調相機 (RC, Rotary Condenser) として流用します。

F1 地点で 2 回線送電線の 2 回線ともが 3 相地絡で停止する故障 (6LG-O) を想定します。

故障除去時間は 0.07 秒とします。基幹系統の重潮流は 275kV 系統に移り、同期安定度が厳しくなるので、発電機 G1 を故障発生から 0.25 秒で遮断します。

シミュレーション結果を図 9.2 に示します。系統は安定を保っています。発電機 G6 を RC として流用しない場合のシミュレーション結果を図 9.3 に示します。発電機 G2 と G3 が同期不安定に至っています。G6 は他の電源が薄い部分に存在しているので系統電圧支持の上で重要な任務を負っています。

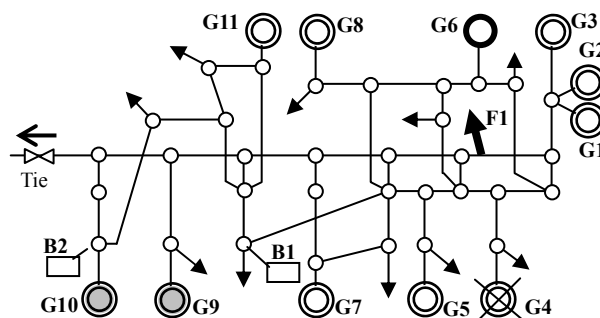


図 9.1 カーボンフリー系統 1 の構造

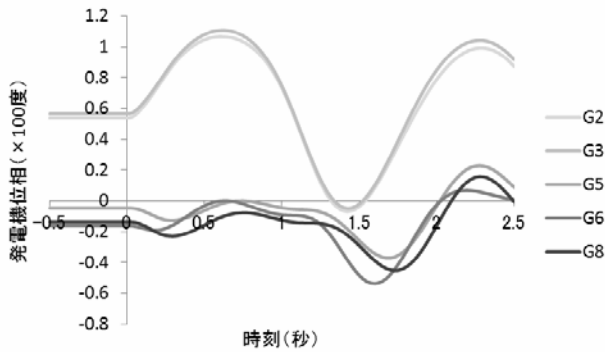


図 9.2 カーボンフリー系統 1(RC あり)

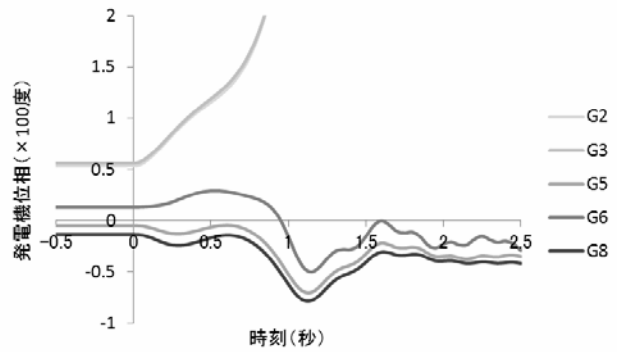


図 9.3 カーボンフリー系統 1(RC なし)

【カーボンフリー電力系統 2】 構造を図 9.4 に示します。新規原子力 G1 と G2 を設けます。原子力 G3 と G4 を強化します。図に示す 9 つの火力を RC として流用します。揚水発電が多いので基幹系統に蓄電池は必要ありません。500kV/275kV 変圧器を必要に応じ強化します。

F1 地点で 2 回線送電線の 1 回線が 3 相地絡で停止する 3LG-O 故障を想定します。故障除去時間は 0.07 秒です。深い瞬低が広範囲に伝播します。一部の負荷が停止します。

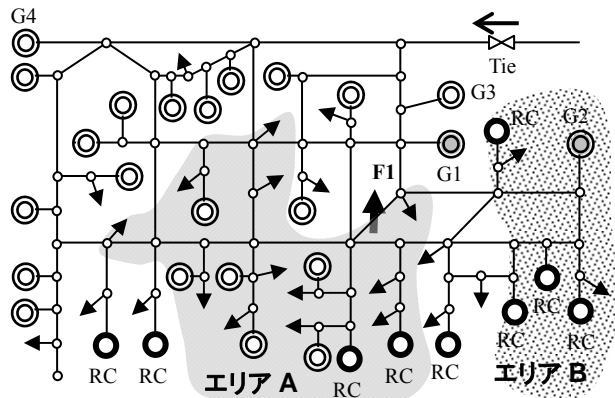


図 9.4 カーボンフリー系統 2 の構造

シミュレーション結果を図 9.5 に示します。9 機の RC があるおかげで、多少時間はかかりますが、系統電圧は回復します。しかし 9 機の RC を廃止するとシミュレーション結果は図 9.6 のようになり、系統電圧は維持できません。

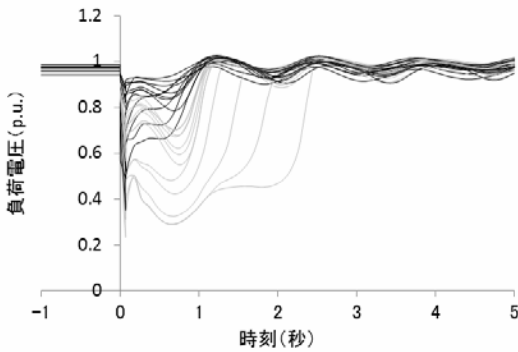


図 9.5 カーボンフリー系統 2(9RC あり)

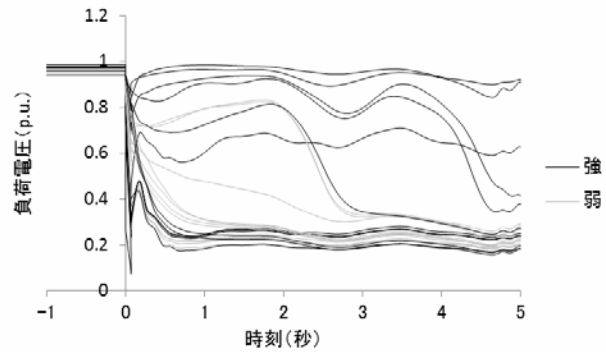


図 9.6 カーボンフリー系統 2(9RC なし)

ところで、エリア B の電源は火力ばかりです。この地域に原子力 G2 が立地できず、かわりに原子力 G1 を増強したとします。B 地域はパワー不足になり、図 9.7 に示すように、9 機の RC があっても電圧不安定に至ります。電圧支持能力を用意していても、エネルギー源の地域バランスを失ったのでは電圧安定度が維持できないことがわかります。

電源と需要は地域ごとにある程度バランスしていなければなりません。電力は「地産池消」であるべきという議論も最近聞かれるようになりましたが、電気工学的にもまさにその通りです。パンケーキを解消してまで広域経済融通による電力取引を拡大しようという構想や、連系線潮流を増やして良いという構想にはリスクも伴います。

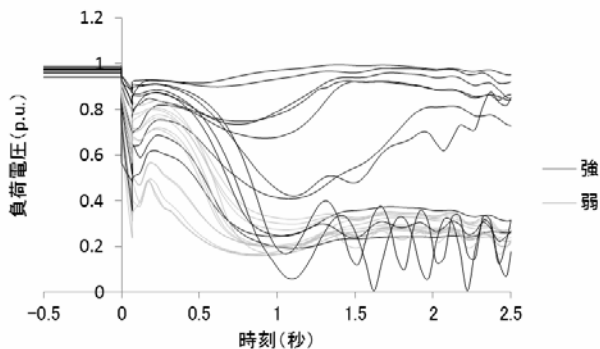


図 9.7 カーボンフリー系統 2(エリア B パワー不足)

【カーボンフリー電力系統 3】 構造を図 9.8 に示します。原子力 G1 を強化します。275kV 系の大型火力 G2 は原子力に転換します。G3 と G4 は火力を廃止し小型の水力だけが残ります。2 箇所の火力を RC に流用します。原子力が増えたので調整用に 6 箇所の蓄電池を基幹系統に配備します。

電源の変化により潮流は右向きから左向きに変わります。いくつかの 500/275kV 変圧器は潮流増大により強化します。

F1 地点で 2 回線送電線の 2 回線とも 3 相地絡で開放する (6LG-O) 故障を想定します。故障除去時間は 0.07 秒とします。系統の末端にあたる右側

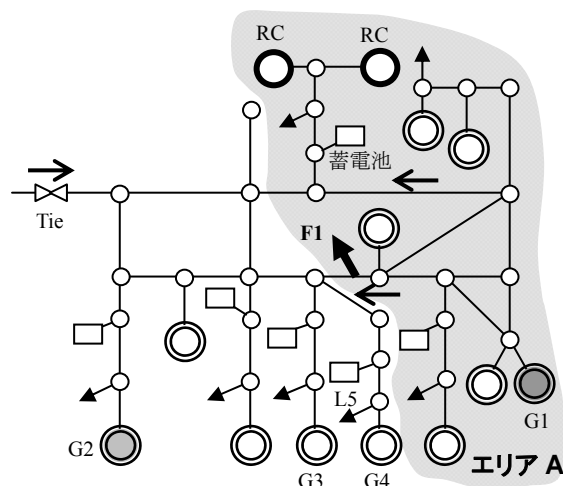


図 9.8 カーボンフリー系統 3 の構造

は多量の電力を左側に送電線 2 ルートで送っていたのが、1 ルートを失い、図で灰色の背景を付したエリア A の同期安定度が厳しくなります。シミュレーション結果を図 9.9 に示します。エリア A の発電機、負荷は灰色の線で表示しました。エリア A 外部の負荷 L5 の電圧回復が遅くなっていますが、これは付近の大量の火力が廃止され電圧支持が弱くなったためです。

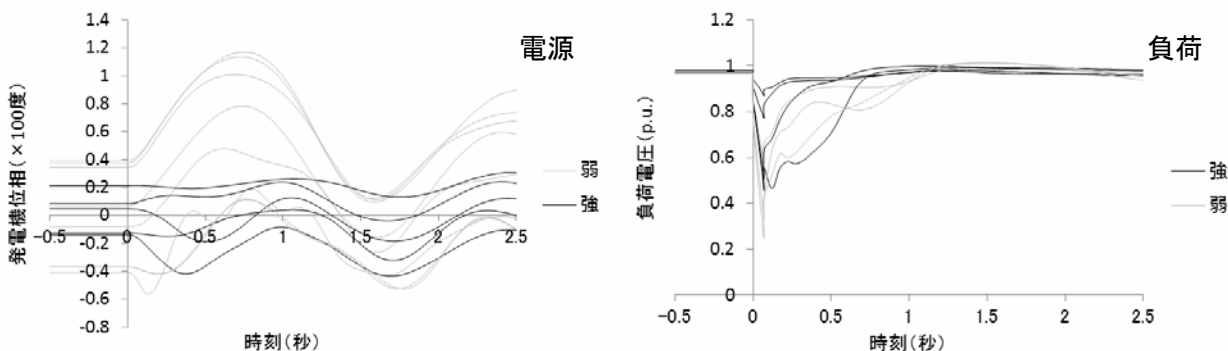


図 9.9 カーボンフリー系統 3(2RC あり)

2 機の RC は故障 F1 の結果生じた細長い系統の途中の電圧を支持する重要な役割を演じています。その重要な 2RC を廃止したときのシミュレーション結果を図 9.10 に示します。エリア A の全発電機は同期外れに至り、全負荷は電圧崩壊し、外部の負荷 L5 も電圧崩壊します。

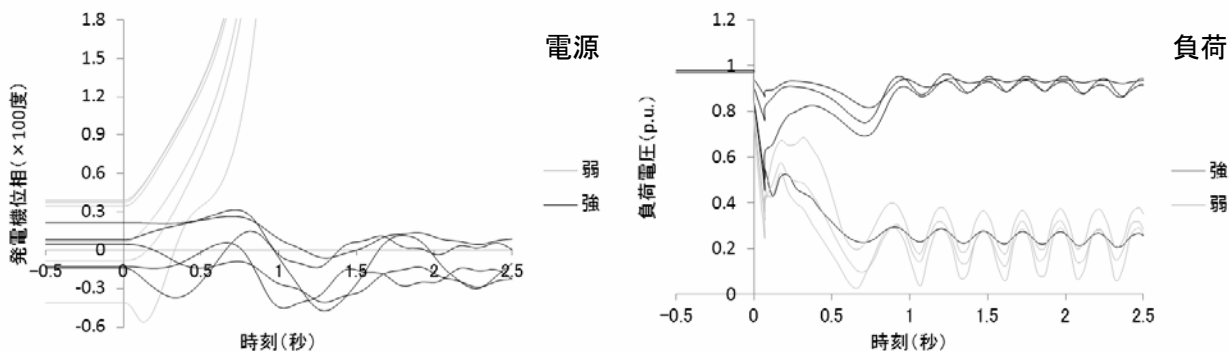


図 9.10 カーボンフリー系統 3(2RC なし)

【カーボンフリー電力系統 4】 構造を図 9.11 に示します。火力 G1 と G2 は廃止します。G3 と G4 に含まれる火力も廃止します。G5 と G6 に含まれる火力は RC に流用します。原子力 G7 を新設します。原子力が増加したので調整力確保のため 3 個の蓄電池を基幹系統に設置します。下り潮流増加によりいくつかの 500/275kV 変圧器を増強します。

エリア A は供給力が不足します。3 つの送電ルートが供給力不足を補うため外部から受電しています。エリア A は G2, G5, G6 に大量の火力がありました。G2 は廃止され、G5 と G6 の火力は RC に流用されました。しかし負荷の 10% の蓄電池が配置されたので供給力不足の問題は幾分緩和されています。

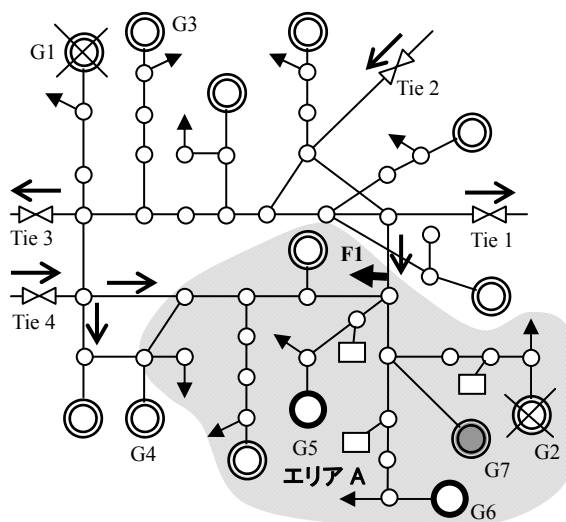


図 9.11 例題 4 系統の構造

地点 F1 に 2 回線送電線の 2 回線とも 3 相地絡で開放する (6LG-O) 故障を想定します。故障除去時間は 0.07 秒とします。外部から受電している 1 ルートが失われ、エリア A の安定度は厳しい状態になります。

シミュレーション結果を図 9.12 に示します。同期安定度も電圧安定度も維持されています。1 負荷だけ若干電圧回復が遅れていますが、【カーボンフリー電力系統 2】の回復遅れに比べれば軽微です。

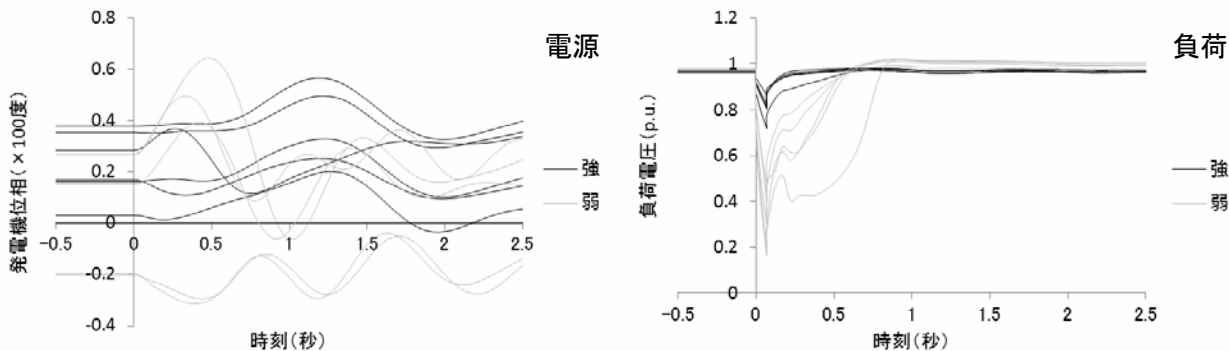


図 9.12 カーボンフリー系統 4(2RC あり)

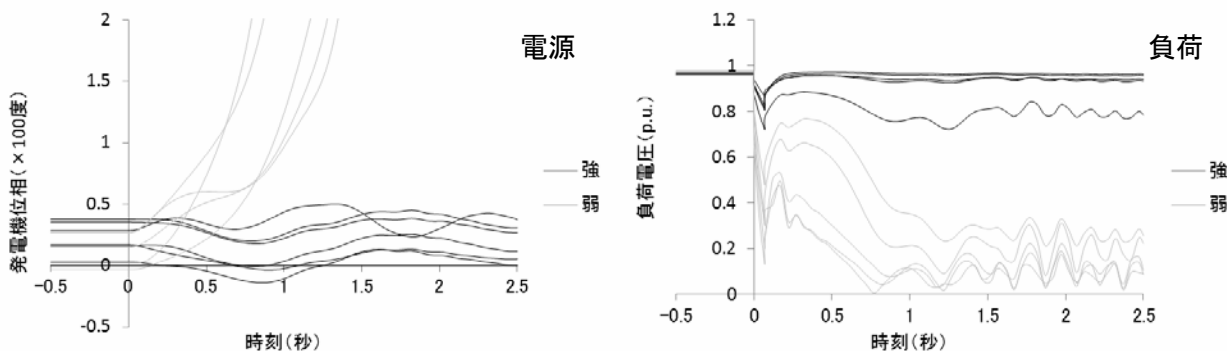


図 9.13 カーボンフリー系統 4(2RC なし)

G5, G6 に含まれる RC はエリア A の系統電圧を支持する役割を担っているため、これを廃止すると安定度は損なわれます。シミュレーション結果を図 9.13 に示します。エリア A の全発電機が同期外れに、全負荷が電圧崩壊に至ります。

いかがでしょうか。夢物語にも思えるカーボンフリー電力も、現代最先端の電力システムの悲観的な（モーター負荷、負荷までの流通経路など）知見を適用してもなお、科学的・技術的には決して手の届かないものではないということです。ならば我ら人類は未来に、科学技術に、もっと希望を持って良いのではないのでしょうか。この希望のもと、電力技術の教育陣・指導層を 21 世紀向けに一新し、優秀な人材を電力技術に誘致・育成し、近未来にむけてスタートダッシュを切る刻限が迫っているのではないのでしょうか。

超 DVS など

このように全 RE を DVS 型とし、一部の火力発電機を同期調相機 (RC) として残せば、カーボンフリー電力は実現可能です。ここで用いている DVS は SVC 同等のもので、これを一段強化して SVG 同等とすれば RC を減らすことも可能かもしれません。更に強化して故障中の短絡電流まで供給する超 DVS を考えている電力会社も現実にはありますが、現在主流の IGBT より一段と過負荷に強い素子が必要となるでしょうし、配電線の短絡電流増大への対処も必要となるでしょう。多大な投資が必要となるかもしれません。著者は火力転用の RC などの補完的な電圧支持機能などの対策が無難ではないかと考えますが、現実にはカーボンフリーが見えてくる時代になれば、電力系統をめぐる技術も今とは相当変わっているでしょうから予断は禁物です。

また第 4, 5, 6 章で検討した DVS は SVC を踏襲したため、飽和のあるリアクトルと定インピーダンスのコンデンサを並列にしたような電圧-無効電力特性と仮定しました。これをインピーダンス型 (Z 型) と呼ぶことにします。連系装置の過電流を回避するため有効電力は電圧の 2 乗特性としました。数式で表現すると次のようになります。

$$P = P_0 (V/V_0)^2$$

$$Q = W_0 [(V/V_0)^2 - V/V_0]^B$$

$$B > 2$$

ところが、現実の RE のパワーコンディショナー (PCS) は IGBT で構成されるため、インピーダンス型よりも電圧維持能力が一段強力な電流型 (I 型) が採用できます。これを数式で表現すると次のようになります。

$$P = P_0 (V/V_0)^2$$

$$Q = W_0 [(V/V_0)^1 - V/V_0]^C$$

$$C > 2$$

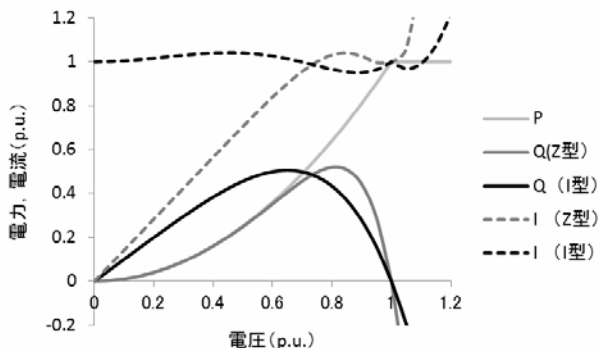


図 9.14 インピーダンス型と電流型の DVS

図 9.14 にインピーダンス型で $B=9.5$ の場合と電流型で $C=4.5$ の場合を比較して示します。無効電力のピーク値は両型とも同等ですが、電流型の方が低い電圧領域で多くの無効電力を供給します。電流はインピーダンス型では低電圧領域で小さくなりますが、電流型では低電圧領域まで大きな電流となっており、電流型の方が連系装置の電流容量を目一杯に使っていると言えます。電圧が 1 以上になると電流値が 1 を超えてしまいますが、これは安定度計算ツールの制約上、こういう模擬の仕方をせざるをえないからです。勿論実際の連系装置は電流が 1 を超えないよう無効電力に制限を加えます。但し安定度が問題となる状態というのは電圧が低い状態ですから、あまり気にすることはないと思います。

【送電システムの同期安定度】 第 5 章で用いた送電システムにおいて Z 型 DVS と I 型 DVS の安定度の比較を図 9.15 に示します。故障除去時間をパラメータにしています。I 型で 0.08 秒故障除去の場合は、Z 型で 0.08 秒故障除去の場合よりも安定ですが、Z 型で 0.07 秒故障除去の場合には劣ります。つまり I 型は Z 型より安定度向上効果がありますが、その程度は故障除去時間にして 0.01 秒の差よりも小さいといえます。

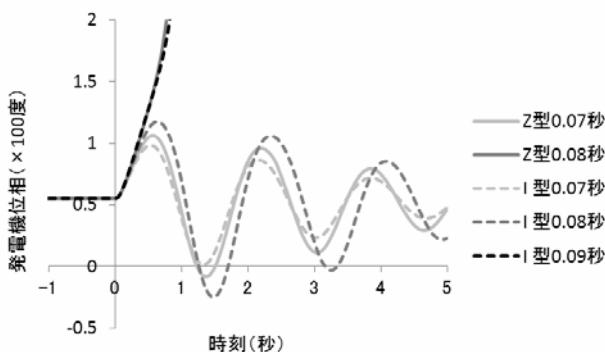


図 9.15 Z 型・I 型 DVS の安定度比較(送電)

【受電システムの同期安定度】 第 5 章で用いた受電システムにおいて Z 型 DVS と I 型 DVS の安定度の比較を図 9.16 に示します。これも故障除去時間をパラメータにしています。I 型で 0.08 秒故障除去の場合は、Z 型で 0.07 秒故障除去の場合と同程度の安定度になっています。I 型で 0.09 秒故障除去の場合は、Z 型で 0.08 秒故障除去の場合より安定になっています。この受電システムでは I 型は

Z型に比べて故障除去時間にして0.01秒以上の安定化効果があるといえます。

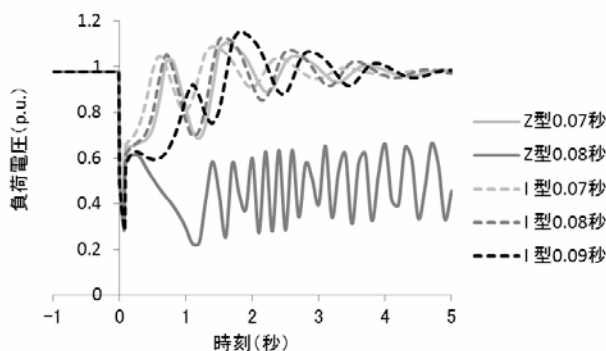


図 9.16 Z型・I型 DVS の安定度比較(受電)

以上のように、前章まで用いてきた DVS は、ごく軽い制御であり、インバータの電流量一杯まで利用すれば、さらに系統安定度の向上が可能になります。さらには、これまでは故障に伴う瞬低の間は無効電力の供給を見合わせていましたが、故障中の無効電力（短絡電流）供給により系統電圧低下量が少なくなり、系統安定度が少し改善できます。

周波数変動問題への対策

連系系統全体という地理的に大きな規模の系統問題は需給不平衡と周波数逸脱です。これまでの検討から以下のような方策が有力と思われる。

【Regulation 蓄電池】 LFC のうち Regulation の部分は蓄電池で十分対応可能です。そのコストを考えてみましょう。軽負荷時の全国日最大需要は 1.2 億 kW くらいです。Regulation にはその±1%程度の調整力、つまり

$$1.2 \text{ 億 kW} \times 0.01 = 120 \text{ 万 kW}$$

があれば十分です。速い変動を対象にするので蓄電池の容量は定格 kW の 0.2 時間分、つまり

$$120 \text{ 万 kW} \times 0.2 = 24 \text{ 万 kWh}$$

あればよいでしょう。速い充放電をするので安価な NaS 電池ではなく高価なりチウムイオン電池を必要とします。単価はコンバータが 3 万円/kW、蓄電池が 20 万円/kWh であるとします。すると設備投資額は

$$120 \text{ 万 kW} \times 3 \text{ 万円/kW} + 24 \text{ 万 kWh} \times 20 \text{ 万円/kWh} = 840 \text{ 億円}$$

となります。これまで兆円規模と言われてきた系統対策費に比べて格段に小さなものです。

これに対して従来の考え方（貯蔵蓄電池）は、LFC 下限の 30%出力で運転している火力を 40%出力に持ち上げて、余分になった発電量を蓄電池に貯めておくというものです。1.2 億 kW の 20%を火力が担っており、1日に5時間貯めるものとします。必要な蓄電池は

$$1.2 \text{ 億 kW} \times 20\% \times (40\% - 30\%) = 240 \text{ 万 kW}$$

$$240 \text{ 万 kW} \times 5\text{h} = 1200 \text{ 万 kWh}$$

となります。単価は、コンバータは同じく 3 万円/kW、蓄電池は充放電の遅い NaS 電池で十分ですから 4 万円/kWh とします。すると設備投資額は

$$240 \text{ 万 kW} \times 3 \text{ 万円/kW} + 1200 \text{ 万 kWh} \times 4 \text{ 万円/kWh} = 5520 \text{ 億円}$$

となります。

こうして経済計算をしてみると、従来の考え方である「貯蔵蓄電池」に比べて新しい考え方で

ある「Regulation 蓄電池」の有利性が際立ってきます。但し、貯蔵蓄電池の場合は Regulation 能力に加えてある程度の Load Following 能力も兼ね備えています。Regulation 蓄電池の場合は Load Following は貯水池式・揚水式発電に依存することとなります。また、双方とも大量の余剰電力が生じるときには蓄電池量が絶対的に不足しており、火力発電に加えて、RE または他の低炭素系統電源も出力抑制する必要があります。

RE も低炭素系統電源も「低炭素」という点で同じ資格を持っていますから、どちらを抑制してもよいでしょう。安全性の面では水力の抑制が問題です。導水路に流れていた水を本川に流すことになり、釣り人などに人身事故が生じるリスクがあります。これに比べて風力・太陽光は安全に捨てることができます。原子力も一定の時間変化率ならば安全に出力変動が可能です。制御コストの面では、小規模分散の太陽光の出力抑制は不利です。遠方監視制御をしている水力や風力、人が常駐している原子力は低コストで済みます。

冷静に考えれば原子力の抑制は魅力的です。但し原子力の抑制に伴い電力会社が RE から購入する電力量が増え、その kWh 単価は安く抑えないと電力側から不満が出るでしょう。目安としては例えば、電力会社が制御コストを負担するものとして、抑制対象を RE から原子力に変更することによる制御コストの減少分に見合う単価ならば、電力側から不満が出ることもないでしょう。全体最適を迫るうえで、設備所有の分散に伴うこうした有利・不利を調整するのが「制度」の主要な役目であると著者は考えています。

【RE 出力予測】 Load Following のために需要予測は大きな力になっています。著者の中央給電指令所における経験では、翌日需要予測の相対誤差は RMS 値（標準偏差 σ に同じ）で年間最大需要の約 2% でした。最大需要が 500 万 kW なら絶対誤差は

$$500 \text{ 万 kW} \times 0.02 = 10 \text{ 万 kW}$$

くらいです。RE 定格出力が最大需要の 30% まで普及するとします。翌日 RE 出力予測の絶対誤差が翌日需要予測の絶対誤差と等しくなる時の翌日 RE 出力予測の相対誤差は

$$0.02 / 0.3 = 0.067 = 6.7\%$$

になります。この値は個別地点のポイント予測ではなく広域予測です。一般に前者に比べて後者の誤差はおおよそ半分と言われています。詳細には検証を要しますが、現在の技術では、この程度の広域翌日 RE 出力予測誤差ならば何とか実現可能ではないかと思われま。

現在の RE 出力予測は気象予測情報に基づいています。これに各種ヒューリスティックを加味して精度向上に努力してはいますが、気象予測情報の精度によって大方の精度が決まってしまう。現在のままでは RE 普及増大に伴って需要予測誤差よりも RE 出力予測誤差が系統運用上の問題になってくるでしょう。そうなる前に気象予測情報の精度の向上を達成しておくのも選択肢の 1 つです。その時期の目安を示すのが系統運用者の責務であると著者は考えます。

【火力発電の運用柔軟性向上】 低炭素時代の火力発電の責務は調整力と予備力になるでしょう。従来はベース電源と見なされてきた石炭火力も調整力と予備力が求められるようになるでしょう。従来、冷機から起動した火力は給電運用に渡す前にフル出力で一定時間を経過する「フル出力試験」の必要がありました。フル出力が出せることを確認するための試験だそうです。給電部門としては、フル出力が出せないリスクがあっても、こういう硬直的運用は、特に RE が大量普及して系統電源の下げ代が不足する時代には避けたいところです。それにもし、試験でフル出力が出せないことが分かっても火力側で打てる対策は無いのですから、試験の意味がどこにあるのでし

ようか。

火力にはその他に、出力帯による補機運転台数の変更のための「バンド切替」の間は出力を一定に維持するという制約もあります。また石炭の種類が変わるたびにフル出力が出せるか否かの「フル出力試験」をします。このような試験や制約は柔軟な系統運用を妨げております。著者は、低炭素時代に向けて、火力部門も運用柔軟性向上に関する研究をすべきと考えます。

同期・電圧安定度問題への対策

数県にまたがるという地理的に中規模の系統問題は系統安定度問題です。これまでの検討を踏まえ、以下のような方策が有力と思われます。

【ハイ・ロー・ミックス】 この言葉は 20 世紀の最後の四半世紀、米国空軍が高級型の F15 戦闘機と普及型の F16 戦闘機をうまく混用して経済的かつ効果的な運用をねらったときのものです。ここでは勿論、「ハイ」とは DVS 型 RE を、「ロー」とは停止型・FRT 型 RE を指しております。第 4 章から第 6 章にかけての分析により、導入した全部の RE を DVS 型にすると RE なしの場合よりも電圧・同期・動揺安定度が良くなることがわかりました。つまり、RE なしの場合と同じ安定度を確保すればよいのなら、一部の RE だけを DVS 型にし、他は停止型・FRT 型に止めておいてもよいわけです。

従来の単独系統検出方式には DVS と相性のよくないものがあります。DVS を採用できるのは DVS と干渉しないタイプの単独系統検出方式を採っている RE か、転送遮断を採っている RE か、そもそも単独系統検出を必要としない特別高压連系の RE に限られます。コスト面からでは DVS を採用すべきは、小型で低压連系する家庭用 PV などではなく、大型で高压以上に連系する業務用 RE ということになります。DVS の採用が *Noblesse oblige* というわけです。現実の電力系統においてもコスト増を伴う制御装置は大型の発電機に数少なく取り付けてトータルでの経済性を追求しています。

ハイ・ロー・ミックスの RE 系統は図 9.17 のような姿になります。ここでまず、停止型の RE は許さないという戦略を提案します。低压連系の家庭用 PV なども最低限 FRT 型であることを要求するわけです。これは FRT 型までならコスト的に無理なく実現できると踏んでいるからです。このときはたして DVS 型（ハイ）と FRT 型（ロー）の割合がどれだけであれば、RE なしの場合と同等の系統安定度が得られるでしょうか。

同時に考えるべきは電力系統側の努力です。ここまでは RE 側の努力ばかりを論じてきたので、このままでは不公平でしょう。そこで最も経済的で効果的な手法として系統電源に超速応励磁を採用します。普通の励磁装置は発電機が無負荷で定格電圧にて運転しているときの界磁電圧の 5 倍の電圧を発生できます。超速応励磁装置は 7 倍の電圧を発生できます。日本海沿岸は冬季に強烈な雷に襲われます。2 回線にまたがる送電線故障も発生します。2 回線×3 相のうち異なる 2 相が停止しなければ高速再閉路により 2 回線停止を

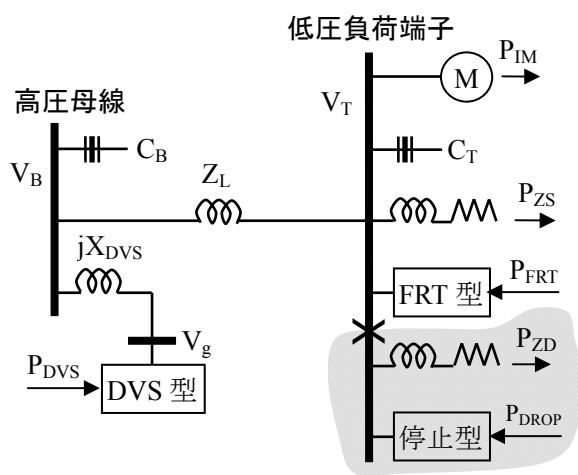


図 9.17 停止型・FRT 型・DVS 型の混在

回避できますが、1相が欠けた状態での送電能力は正常時から極度に低下しますので、同期安定度が問題になります。その対策としてしばしば採用されるのが超速応励磁装置です。厳しい故障の間、界磁電圧を7倍にまで高め、発電機の同期化力を高く維持しようという目論見で、今まで大きな成功を収めている方式です。典型例を図9.18のブロック図に示します。実績は多くあり、励磁装置の容量は主発電機容量に比べてうんと小さい(1%くらい)ので経済的に大きな負担にはなりません。これを大型REより更に大型の系統電源のnoblesse obligeと考えることもできますでしょう。

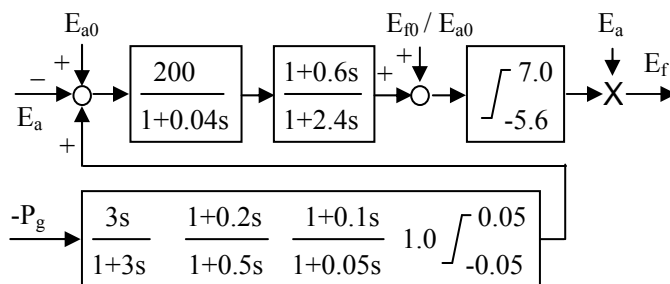


図 9.18 典型的な超速応励磁装置のブロック図

【電圧安定度】 第4章の大規模基幹系統の例を用います。REは定格容量で発電しており、需要の20%をまかなっています。瞬定による一部負荷停止を模擬します。

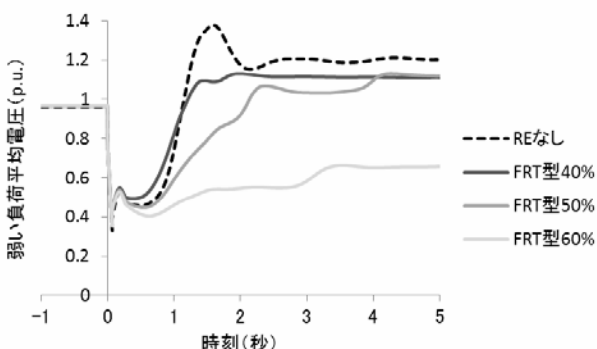


図 9.19 FRT 型比率と電圧安定度(普通励磁)

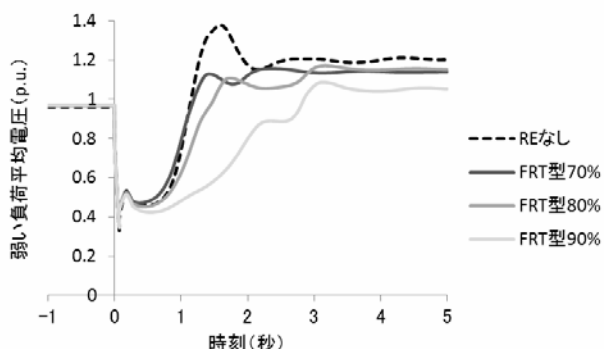


図 9.20 FRT 型比率と電圧安定度(超速応励磁)

普通の励磁装置の場合、図9.19のように、FRT型が40%以内(DVS型60%以上)ならばREなしの場合とほぼ同じ電圧安定度になります。弱い負荷のエリアに属する発電機全部を超速応励磁にすると図9.20のようになり、FRT型70%以内(DVS型30%以上)ならばREなしの場合とほぼ同じ電圧安定度になります。超速応励磁はFRT型30%増加可能という結果をもたらすので、結構大きな電圧安定化効果を持っていると評価できます。

【送電系統の同期安定度】 第5章で紹介した送電系統の例を用います。REは定格容量で発電しており、需要の20%をまかなっています。瞬定による一部負荷停止を模擬します。普通の励磁装置の場合、図9.21のようにFRT型が60%以内(DVS型40%以上)ならばREなしの場合とほぼ同じ同期安定度になります。この送電系統の中央部の大規模需要をはさむ左右の発電機4機に超速応励磁装置を適用すると同期安定度は格段に良くなり、FRT型に代えて停止型とすると図9.22のよう、停止型70%以内(DVS型30%以上)ならばREなしの場合とほぼ同じ同期安定度になります。超速応励磁は停止型60%も許容可能という大きな同期安定化効果を持っていると評価できますが、この送電系統では過剰品質でしょう。

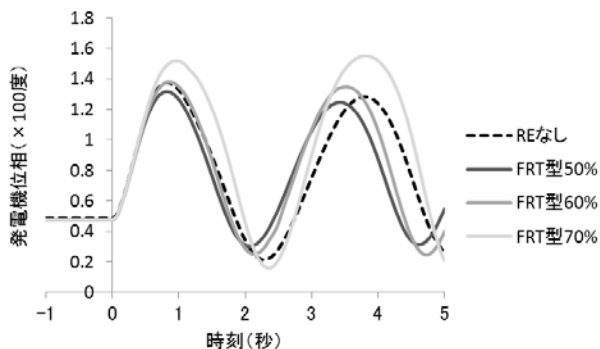


図 9.21 FRT 比率と同期安定度 (普通励磁)

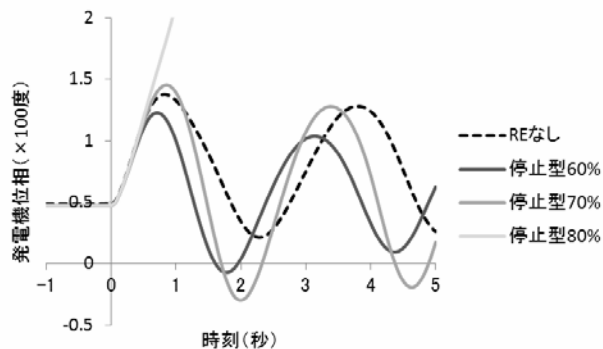


図 9.22 停止型比率と同期安定度 (超速応励磁)

【受電系統の同期安定度】 第 5 章で紹介した受電系統の例を用います。RE は定格容量で発電しており、需要の 20% をまかなっています。瞬定による一部負荷停止を模擬します。普通の励磁装置の場合、図 9.23 のように FRT 型が 20% 以内 (DVS 型 80% 以上) ならば RE なしの場合とほぼ同じ同期安定度になりますが、非常に同期安定度が悪いと言えます。この受電系統の弱点部の発電機 3 機に超速応励磁装置を適用すると図 9.24 のように格段に安定になり、FRT 型 80% 以内 (DVS 型 20% 以上) ならば RE なしの場合とほぼ同じ同期安定度ができます。超速応励磁は FRT 型 60% 増加可能という結果をもたらすので、非常に大きな電圧安定化効果を持っていると評価できます。但しこの結果には理由があって、弱点部の発電機の 1 台が非常に弱い励磁装置になっておりました。

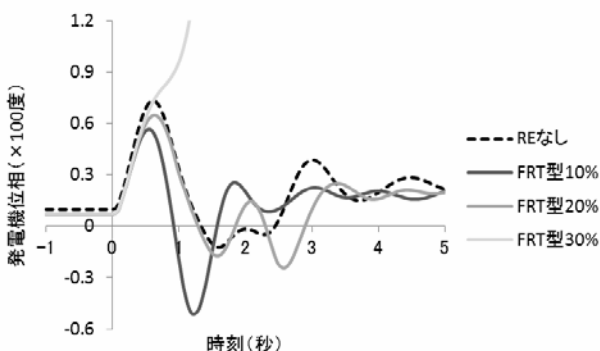


図 9.23 FRT 比率と同期安定度 (普通励磁)

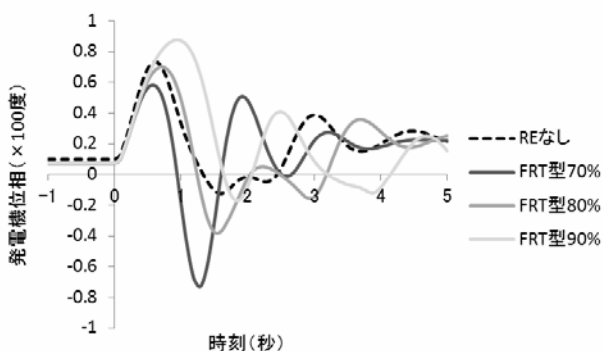


図 9.24 FRT 型比率と同期安定度 (超速応励磁)

【動揺安定度】 第 6 章で述べた通り、送電系統と受電系統では動揺拡大のメカニズムが違います。従って、ここでも同章で紹介した送電系統と受電系統の双方で検討します。動揺安定度においては停止型と FRT 型は同じ結果を与えますから区別しません。また超速応励磁は同様な安定度には効果がないので考慮しません。まず送電系統です。計算結果は図 9.25 のように FRT 型が 90% 以内 (DVS 型 10% 以上) ならば RE なしの場合とほぼ同じ同期安定度ができます。つまり僅か 10% の DVS 型 RE で動揺安定度を改善できます。

次に受電系統では、計算結果は図 9.26 のように FRT 型が 80% 以内 (DVS 型 20% 以上) ならば RE なしの場合とほぼ同じ同期安定度ができます。つまり僅か 20% の DVS 型 RE で動揺安定度を改善できます。

送電系統、受電系統とも少量の DVS 型 RE を導入することで RE なしの場合と同等の安定度が得られますので、動揺安定度は電圧安定度、同期安定度ほど深刻に考える必要はありません。加

えて、動揺安定度は励磁装置の設計改善でかなりの程度まで改善できます。よって、本章で今まで扱った3種類の安定度問題の中では最も解決が容易で、他の2つの安定度問題が解決されれば自動的に解決されると言っても良いでしょう。

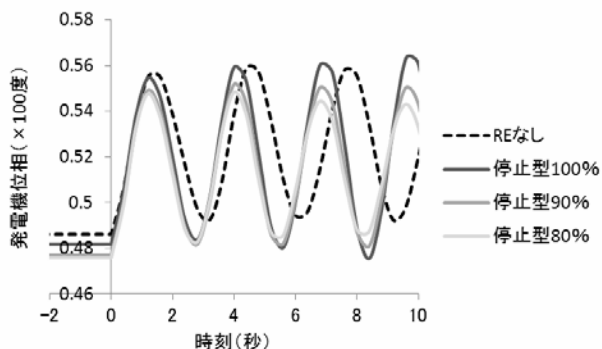


図 9.25 FRT 型比率と動揺安定度(送電)

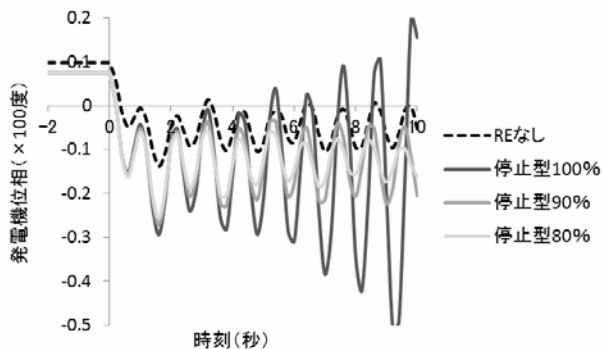


図 9.26 FRT 比率と動揺安定度(受電)

【RE にどこまで DVS 機能を要求するか】 DVS 基準が明記されている Grid Code がまだ少なく、独 E-ON の例くらいしかありません。これを図 9.27 に示します。本書で仮定した DVS 機能を無効電流に換算した結果を併記します。E-ON の基準は無効電流を RE の定格一杯まで出力することを要求していますが、そのときの電圧は 0.5 で、これはやや低すぎると思います。本書の仮定は制御のカーブが立っていて、少しの電圧変化で大きな無効電流を変化させ、SVC に近い特性になっています。

FRT だけでは系統安定度を現状水準に維持することは難しそうで、補完策としては、電力系統に SVC 等の電圧維持装置を配備するよりも RE に DVS 機能を持たせるのが得策というのが第 4 章から第 6 章の結論でした。

しかし DVS 機能は単独検出など他の機能と干渉する場合があります。ここで計算したように RE の DVS に替えて系統電源に超速応励磁を適用すれば、系統安定度はかなりの程度まで改善でき、DVS (または追加の SVC 等) の適用を減らすことができます。

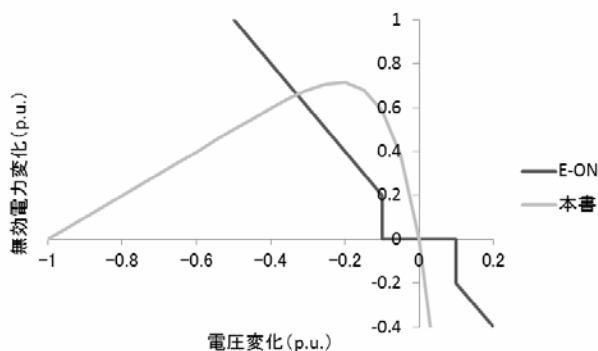


図 9.27 独 E-On 社の DVS 基準

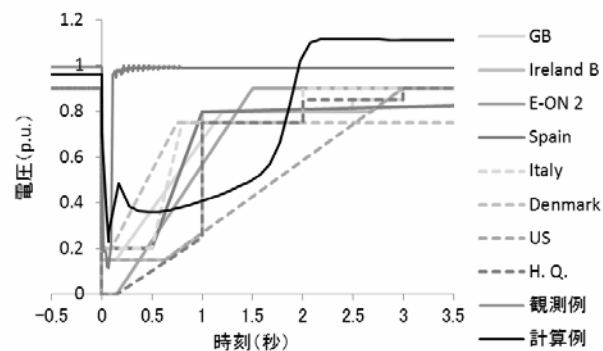


図 9.28 世界各国の FRT 基準

【RE にどこまで FRT 機能を要求するか】 世界各国の電力会社は RE 系統連系の基準を Grid Code に定めています。文献(1)は多くの事例を収集、比較、検討していますので大いに参考になります。現在のところ先進国というべき諸国の電力会社の多くが FRT 基準を定めて運用しているか検討しています。それを図 9.28 に示します。もちろん線の上側では RE は停止してはならないという基準です。

耐えるべき瞬低の深さには 3 種類あり、残り電圧 0%、15%、20%です。図には著者が観測し

た最も深い瞬低の実例を併記しました。残り電圧は15%ほどであり、各国、各電力会社の Grid Code は妥当な選択をしているといえるでしょう。中に、残り電圧0%に耐えよとしている Grid Code もありますが、これはやや行き過ぎと著者は思います。こんな深い瞬低は下位系統の3相地絡故障に限られ、下位系統の瞬低は広範囲に波及することはなく、たとえ故障近傍の一部の RE が停止したところで系統安定度に問題は生じません。他方、系統安定度に問題を生じる基幹系統の故障では、こんなに深い瞬低は発生しません。

瞬低の継続時間は国、電力会社でかなりの幅があります。図には著者が計算した中から電圧回復が遅かった例を併記しました。米国の FRT 基準なら、これほど遅い電圧回復にも耐えられます。もし耐えられなかったら、負荷電圧は回復できません。欧州各国、各電力会社の FRT 基準は少々緩いかな、という気がします。

従来の RE は深さ20%（残り電圧80%）程度の瞬時電圧低下（瞬低）で容易に停止してしまいました。それが系統安定度に悪影響を及ぼすことは第4章から第6章に述べた通りです。著者が説いたのは電力の50%以上を消費している誘導電動機が瞬低中に回転数低下することで電圧・同期安定度を悪化させ、瞬低で停止する RE はその不安定を助長するというものです。学術論文にも公表しました。この現象は計算において誘導電動機負荷を模擬しないと現われません。他の研究者は瞬低で RE が停止することで広域的に過大な潮流が出現し、これが動態安定度を損ねるとしております。この現象は誘導電動機負荷を模擬しなくても現れます。但しまだ学術論文としては公表されておられません。何がどう影響したかは分かりませんが、2011年現在、次の系統連系ガイドラインの見直しに当たっては FRT 要件が盛り込まれる機運になっております。

盛り込まれそうな要件は、残り電圧が30%にまで低下しても運転を継続すべしというものです。残り電圧が20%での FRT は、電圧位相検出の問題があって、現在の技術では難しいと考えられております。FRT が機能を発揮すべきは広域に瞬低が及ぶ故障、つまり基幹系統の故障です。こういう場合、負荷端の電圧が30%以下に低下することは極めて稀であることを著者は数百例の瞬低観測データから確認しております。瞬低に伴い観測された負荷端の最低電圧は10%ですが、これは66kV系統の3相故障によるもので、ごく狭い範囲の瞬低であり、その地域で RE が全部停止したとしても系統安定度上の問題は生じません。

つまり、現在の技術水準で実現できる残り電圧30%という FRT の性能は、系統安定度問題に限ってみれば十分であると言えます。そのかわり全ての RE に義務化する必要があると考えます。残り電圧30%までの FRT は、コンバータ電源では容易に実現可能で、著者らの研究でも実機で実現した何例かがあります。

但し、風力は注意が必要です。インバータ連系の場合は PV と同じことですから FRT は容易に実現可能ですし、特高連系ならば単独系統解消の必要もないから DVS も容易に装備可能ですが、多数派である DFIG（Doubly Fed Induction Generator、二次励磁誘導発電機）に FRT 機能を搭載するのはまだ難しいようで、FRT 機能つき DFIG 風力発電機が市場に投入されたという情報は、2011年現在、まだ得ておりません。新ガイドラインで FRT 要件が求められた場合、DFIG 風力発電機の製造者はどうするのでしょうか。

更に小さい残り電圧でも機能する FRT の開発が将来の目標に挙げられておりますが、著者としては、これは努力目標程度のものであり、何かを犠牲にしてまで達成すべきとは考えておりません。また、達成できそうもないから FRT 全体を諦めるというのも極論だと思います。

周波数安定度問題への対策

【蓄電池調速機】 第7章の分析結果では、REが水力単独システムの周波数安定度を損ねる要因は2つありました。第1のREの有効電力の正の周波数感度を用いた単独防止機能は、規制して除外しても、他にも単独防止機能があるので、問題ありません。第2のREのDVS機能が Δf 型PSSの機能を損ねる問題はやや深刻といえます。しかしREの他の系統影響のために蓄電池が導入されます。この蓄電池に調速機機能を持たせれば非常に遅れの少ない特性が実現できます。ここでは時定数1秒の1次遅れと仮定します。このくらいの特性は容易に実現できます。

水撃作用 T_w が2秒という非常に不安定な水力調速機70%と遅れの少ない（時定数1秒の1次遅れを仮定）蓄電池調速機30%を混合したときの総合的調速機機能の周波数応答を計算すると図9.40のようになります。位相遅れは劇的に減少しており、これならば単独システムが周波数不安定を引き起こすおそれは全くありません。問題は水力単独システムを形成する範囲に蓄電池が立地できるか否かです。

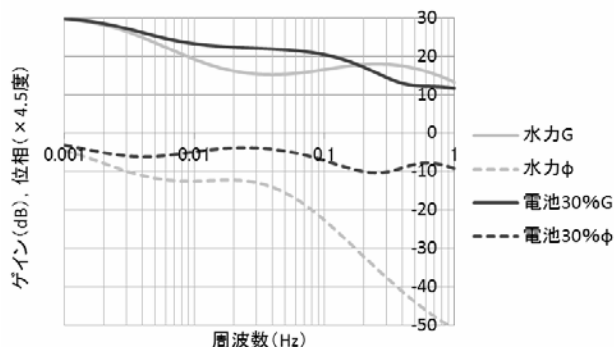


図 9.40 蓄電池調速機混用の効能

【水力単独システムの一旦全部停電】 第7章に述べた通り、周波数不安定は水力単独システム特有の現象です。筆者の奉職した電力会社は水力発電の割合が高く、水力単独システムが生じた場合は単独を維持して主システムへの早期並列を図るというドクトリンでした。しかし全国的に見れば水力単独システムで需要が100万kWを超えるものは滅多になく、単独システムを一旦全部停電させて復旧するというドクトリンの方が支配的なようです。

また我が国では流通設備のサイズが大きく、水力単独システムの電源が停止した状態でも主システムから当該全需要に送電可能な場合がほとんどのようです。従って水力単独システムを一旦全部停電したとしても需要復旧に要する時間はごく短いことになり、水力単独システムを維持する動機は強くなり、水力単独システムの周波数安定度を維持する動機も強くないことになります。冷静に考えれば、REの設計によっては悪化することもあります。水力単独システムに限定される周波数安定度問題をことさら大きく取り上げる必然性はないと著者は思います。

電圧逸脱問題への対策

詳細は計算してみなければ分からないのですが、PVの $Q=-0.2P$ 進み定力率運転、配電用変圧器タップのLDC制御、LDC機能つきSVRの三者の併用により、いかなるPVの大量普及形態が出現しようとも電圧逸脱を回避できるものと著者は推定しています。これらの技法は検証済みの枯れた技術であり、自律分散という最も簡単な制御であり、追加ハードウェアはSVR本体とLDC用のPT、CTだけゆえ低コストです。巷間言われる双方向通信に基づくスマートグリッド手法のコストはまだ誰も見積もっていないようですが、これら三者の組み合わせよりも高いものになることは十分予想できます。双方向通信は需要制御も可能とする長所がありますが、原子力の抑制まで踏み込んだ将来において需要制御の価値がどれだけあるか、著者は疑問とします。

なお、電力各社の技術者の発言から LDC には「ベクトル LDC」と「スカラーLDC」の2種類があるのではないかと著者は推理したのですが、聞き取り調査の結果、ベクトル LDC が2社、スカラーLDC が4社、LDC を使っていないのが4社と判明しました。PV が大量普及すると、PV 進相運転だけで LDC を使わなければ配電電圧上昇問題が生じ、スカラーLDC では配電バンク逆潮流時の LDC 逆効果問題が生じます。たいていコストのかからないベクトル LDC を使わないで、つまり大規模な系統側が最善の方策を採らないで小規模な PV 側にコストのかかる対策を要求するのは Noblesse Oblige の原則に反するでしょう。幸い PV が大量普及するまでには時間的余裕がありますから、それまでにベクトル LDC を装備して使いこなしに習熟すればよいのです。今がそれを開始する時期です。

「スカラーLDC」というミュータントが出現した背景には「重負荷時には電圧降下が増えるから送り出し電圧を上げればよい」という、近似的には正しいが厳密さに欠ける認識が支配していたことがあるのではないかと著者は考えています。正確には「LDC はバンク傘下の負荷の加重平均電圧を推定し、これを目標値に制御する」と言うべきです。言葉の厳格さに甘かったがためにミュータントを産み出したことを技術者は深く反省すべきと思います。

スマートグリッド

この用語の定義は明らかではありませんが、双方向通信を用いて風力・太陽光発電などの分散型電源やエコキュート・電気自動車などの需要機器を電力系統と結びつけ、プラスの効果を求めるものであることは間違いのないようです。特に日本では風力・太陽光発電などの大量導入に伴う電力系統影響を緩和する有力な手段としてスマートグリッド (SG) が期待をもって語られています。その一方、SG の課題については多く語られていません。せいぜい通信セキュリティー侵犯、プライバシー侵犯のような犯罪がらみのことが予想されているだけです。

他に課題はないのでしょうか？ ヒントとして SG を図 9.43 のように表現してみます。この表現法は、しばしば人体に例えられることがあります。

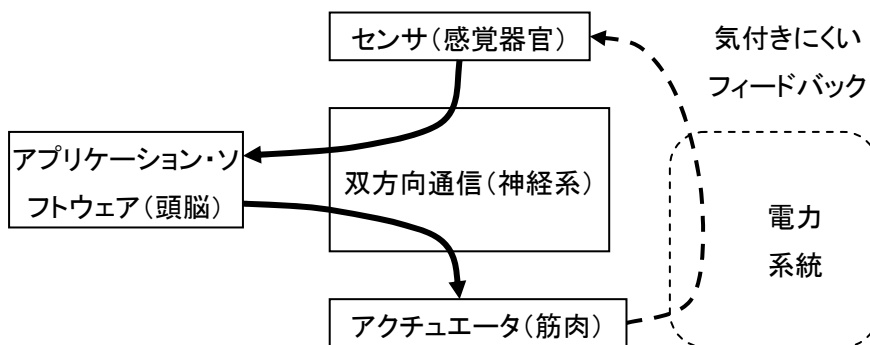


図 9.43 人体に例えられるスマートグリッドの構造

これから直ちに【課題 1】と【課題 2】が浮かんできます。

【課題 1】 第 1 の課題は、図に点線で書き加えた部分です。アクチュエータ (筋肉) が動けば電力系統に何がしかの影響を与えます。その結果をセンサ (感覚器官) が拾うことは十分考えられます。そうすると、気付きにくいかもしれませんが、フィードバック・ループが形成されます。ところで双方向通信やアプリケーション・ソフトウェアが仕事をするには時間がかかります。高

度な仕事をするほど時間がかかります。つまりループの中に時間遅れ要素がたくさん入ってきてしまい、その結果、ループがとても不安定なものになってしまいます。不安定になるということは望む制御ができないことは勿論、制御の結果がどうなるか予想できないことを意味します。SG が実現したとき、時間遅れを克服した安定なループもまた実現しているでしょう。

【課題 2】 センサ・双方向通信・アクチュエータの技術は、既に相当のところまで仕上がっています。ところが頭脳にあたる部分、つまりアプリケーション・ソフトウェアはまだ出来ていません。

この頭脳が扱う対象の数は、組み合わせも考慮すれば膨大です。この頭脳はおそらく、自己学習能力も備えた高度な人工知能 (Artificial Intelligence, AI) となります。(現に SG の技術者には過去に AI の技術者だった人が少なからずいます。) センサ・アクチュエータ複合体としての端末もスマート化し、SG は大規模 AI 網となります。SG が実現したとき、人類は初めて複合的大規模人工知能という画期的なものを創造したことになるでしょう。

【課題 3】 図から直接にはわかりませんが、もう 1 つ課題があります。SG はしばしば第 2 のインターネットと言われます。インターネットが成功した理由は、突き詰めて考えれば、端末の向こうにいるのが人間だからです。人間は常識を持ち、正常な判断をしてくれて、おまけに結果責任を負ってくれます。しかし、SG を系統制御に用いる場合、端末の向こうにいるのは機械です。膨大な組み合わせの数からして SG の全機能を試験で確認することは無理でしょう。深刻な被害が生じたとき、その責任は誰に帰するのでしょうか。SG が実現したとき、結果責任帰属の問題もまた解決しているでしょう。

SG という人類の壮大な挑戦に同時代人として参加しているという興奮を著者も感じています。しかし今まで提案されているのは頭脳を除く周辺機器等のセールスに過ぎません。SG への期待の大きさは十分理解できるのですが、全てを SG の実現に賭けてしまうのも考え物でしょう。半分は SG で解決という折衷案もありえます。ですから、SG の負担を減らすべく、またセーフティネットとしても、経済的かつ確実な方法で再生可能エネルギー大量導入に伴う電力系統上の問題のなるべく多くを解決しておく努力が必要と感じます。

システム工学

これは蛇足かもしれませんが、少し詳しく述べておきます。著者が大学学部で習った「システム工学」では、答えは 3 種類作れと教えています。どんな 3 種類かといいますと、こういうものです。

【A 案】 Aggressive (攻撃的) な A 案。先進的。陳腐化しにくい。従ってシステムの歴史的寿命は長い。しかし納期までに実現しないかもしれない。

【B 案】 A 案と B 案の折衷案。Balance の B 案。

【C 案】 Conservative (保守的) な C 案。今使える要素技術だけで作り上げる。納期までに確実に実現できる。陳腐化しやすい。従ってシステムの歴史的寿命は短いかもしれない。万策尽きた場合に備えて必ず用意しておくべき案です。

SG というのはおそらく Aggressive な A 案なのでしょう。本書で紹介してきた分散型電源の系統影響緩和策は、おそらく Conservative な C 案なのでしょう。システム工学は A 案も C 案も、ともに重要不可欠と教えています。両者の中間に無数の B 案を考えることができます。どの案が良

いかは「有用性 (Usefulness)」、「信頼性 (Reliability)」、「両立性 (Compatibility)」、「経済性 (Economy)」の4つの指標で判断すべきというのもシステム工学の教えです。

この中で「両立性 (Compatibility)」というのは聞き慣れない言葉ですから、少し説明しておきます。どんなシステムも登場の当初は、もっと大きなスーパーシステムの一部に組み込まれます。その際、スーパーシステムの中で孤立してしまうことを両立性がないと言い、折り合いがつくことを両立性があると言います。有力ではあっても両立性がなかった歴史的事例の代表が新幹線です。このようなスーパーシステムとの折り合いを特に「後向き両立性 (Backward Compatibility)」と言うことがあります。

後向き (Backward) があるから、対になる「前向き両立性 (Forward Compatibility)」もあります。将来にわたってシステムが拡張して行っても限界に突き当たることがなければ、新たなシステムを作り直す必要がありません。こういうシステムは歴史的寿命が長く、長い目で見れば経済的です。別名、「拡張性」とも言います。拡張性に富むシステムの代表がテスラによる並列供給による交流電力システムです。エジソンにより電力が初めて実用化されたときは直列供給による直流電力システムでした。並列の方が直列よりも拡張工事が容易です。交流の方が直流よりも扱いが容易です。そういうわけでテスラ以来の交流電力システムは長い歴史的寿命が得られたわけです。

いかがですか。システム工学って役に立つとは思いませんか？ところがシステム工学にも難点があります。それはシステムに含まれる多種多様なパーツの知識が必要なため、全部を習得するのに非常に長期間を必要とするということです。大学の博士課程まで学んでも不足です。学び始めて短期間に思うような成果があげにくいわけで、当然、研究者はそういう分野を敬遠します。でも、それではこういう役に立つものが廃れてしまいます。そこを何とかしたい主体は産業界です。電力業界は電機業界と協力してパワーアカデミーを立ち上げ、電力系統工学、システム工学も含めた電力技術の確保のために大学とコラボレーションを始めました。今後このような技術確保・発展は益々重要になっていくと思います。企業としても社会的責任の一端がここにあると思います。

文献

- (1) Iov, Hansen, Sorensen, Cutululis: “Mapping of Grid Faults and Grid Codes”, Riso National Laboratory Technical Report, Technical University of Denmark, 2007