

10, 再生可能エネルギーのFRTの効能

わが国の連系規程⁽¹⁾は再生可能エネルギー (Renewable Energy, RE) に FRT (Fault Ride-Through, 故障時運転継続) 機能を要求しているが, DVS (Dynamic Voltage Support, 動的電圧支持) 機能は要求していない。欧米では FRT のみならず DVS 機能も要求するようになりつつある⁽²⁾。わが国で DVS 機能を要求しない理由の 1 つは, RE 側だけで単独運転検出を行なわねばならず, この機能と DVS 機能の併用可能性について未だ研究開発が進んでいないためである。はたして現在の規程は概ね妥当な要求をしているのか, 一度は確認しておく必要がある。

しかしそのためには, FRT, DVS 機能の価値を推定するという難しい作業を行わねばならない。FRT, DVS 機能の価値は, その機能があることによって節減できる安定化装置 (本稿では SVC, Static Var Compensator, 静止型無効電力保証装置) の量 (従って価格) で評価することはできる。

しかしながら次のような困難がある。

- ① 評価対象は単なるモデル系統ではなく, 実在の系統をよく模擬したものでなくてはならない。
- ② 負荷とこれに並列する RE と SVC の組の数は多数となるが, あらゆる箇所の故障に対して系統安定を保ちうる SVC の最適配置量を求める必要がある。
- ③ SVC 最適配置量は一年を通じていかなる潮流断面においても系統安定を保ちうるものでなくてはならない。

このような困難な課題に対し, 厳密最適解を求めることは人間技では無理である。しかしながら実用上有益な準最適解なら求めることはできる。

FRT, DVS の効能を求める方法

前節では FRT, DVS の効能を求めることが困難である理由を 3 点述べた。本節ではそれらへの対処方法を考える。詳細は文献(3)に詳しい。

実在系統モデル 実在の 500kV 系統をほぼ保存したように見える系統モデルとして電気学会の EAST30, WEST30 がある⁽⁴⁾。しかし 500kV 系統そのものの模擬が不十分であること, 実在系統の特性を保存していないと報告自体が明言していること, さらに誘導機を含まない静的負荷が 66kV 級母線に直付けされていることは不適切である。誘導機については, これを模擬する・しないによって FRT の効能の評価が大きく変わる⁽⁵⁾ことが報告されている。よってこれらは実在系統モデルとしては不適当である。

そこで著者は別途, 上記欠点を補完し, 実在系統モデルとしてふさわしい EAST40, WEST40 を作成し, 本稿にはこれらを用いた。500kV 系統はほぼ網羅し, Y 結線縮約法⁽⁶⁾を適用して発電機励磁系なども含めて系統の動特性の保存に努めた。負荷は 66kV 級母線から「負荷ブランチ」インピーダンスを介して, 誘導機 50%と定インピーダンス 50%の混合負荷に接続した。これまでの瞬時電圧低下 (瞬低) の観測結果⁽⁷⁾から誘導機の比率 (誘導機消費電力/負荷消費電力) は 50%, 単位慣性定数は 0.5 秒, 負荷率 (消費 kW/容量 kVA) は 50%とした。

学術論文としては再現性が重要であるから, 当然のこととして, EAST40, WEST40 の全データは開示する必要がある。ところが, データの分量の多さはページ数さえふやせば克服できるものの, 保安上の理由から電力会社は基幹系統のデータは公表できないという難しさがある。

この難点に対しては次のように考える。実在系統の詳細データを所有している技術者は多い。これまでの研究から, 66kV 級母線から負荷端子に至る「負荷ブランチ」インピーダンスは平均的に, ピーク需要ベースで $3.5\% + j17.5\%$ であることがわかっている⁽⁶⁾。既存データにこのインピーダンスを追加し, Y

結線縮約法を適用すれば、本稿で用いた系統モデルに近いものは作成可能であり、完全ではないが、再現性のかなりの部分は担保されていると考えてよい。

SVC 最適配置 実在系統において故障はどこでも生じうる。故障点に近い負荷中の誘導機ほど瞬低中に大きく減速し、故障クリア後の電圧回復が遅れる傾向にある。従って、負荷量に比例した量の SVC を各負荷に併設することには一定の妥当性がある。もちろん例外はあり、有力なローカルが近傍にある負荷中の誘導機は瞬低によって減速しにくくなるが、これは次の段階の精緻化と位置づけ、本稿ではそこまでの最適化は行わない。

こうして負荷量に比例した量の SVC を配置してシミュレーションを行い、弱点ではないかと疑われる全ての箇所を故障を起こしてみる。全負荷が電圧回復するまでの時間が最も長い箇所を最弱点と位置づける。

次に、需要量に対する SVC 量の比率を加減して、最弱点での故障により全負荷が電圧回復するまでの時間が 1 秒になるようにする。このときの全 SVC 量を以て SVC 所要量とする。1 秒とするのは現行の連系規程が低圧 PV の FRT 継続可能時間を 1 秒と定めており、電圧低下が 1 秒以上継続すると FRT を放棄してよいことになっており、電圧回復途上で FRT が放棄されると電圧回復しきれず、電圧崩壊に移行する危険が大きいからである。なお、現行連系規程では高圧連系の RE の FRT 継続可能時間を 0.3 秒でよいとしているが、これは以下のシミュレーション事例からわかるように、実物電力系統の安定限界付近でのふるまいを勘案すれば、短すぎる。

こうして得られた SVC 配置は、もちろん厳密な最適解ではなく、準最適解に過ぎない。しかし、系統のどこに故障があっても 1 秒以内に全負荷が電圧回復するのであるから、十分条件にはなっている。実物系統の運用者としては、最適性は不十分ではあっても、十分条件になっていれば、準最適解として受け入れ可能である。もちろん経済性のためにも最適化をより精緻化することには価値があるが、本稿ではそれは各系統の運用者の工夫しだいである、という位置づけにしておき、これ以上は立ち入らない。

全潮流断面 実在系統において故障はいつでも生じうる。ヒューマンエラーや GIS 内部故障は季節や気象に関係なく起こりうるからである。従って全ての潮流断面において所望の性能を実現しなければならない。それを確認するには無限のケースのシミュレーションをしなければならない。

同期安定度はピーク需要断面において、電源の内部位相角が最も進むので、最も厳しくなる。しかしながら時期により並列される電源には仕様や配置の相違があり、どの時期で同期安定度が最も厳しくなるかは断定できない。従って、毎月の典型的ピーク需要断面で精査するなどの方法が必要になる。

ところが誘導機負荷を模擬すると事情が変わってくる。電力系統に大量に存在する 2 種類の回転機：同期機と誘導機は、図 5.1 (再掲) に示すメカニズム⁸⁾により相互に同期安定度と (速い) 電圧安定度の悪化を助長しあう。本稿でのケーススタディで出現した不安定現象は誘導機の電圧不安定が主体であり、同期安定度が破れるのは電圧不安定の余波である。これは電源ではなく負荷に並列する SVC 量を多くすることにより安定化することからわかる。SVC が負荷中の誘導機の電圧不安定を防止することにより、余波として生じる同期不安定も防止しているわけである。

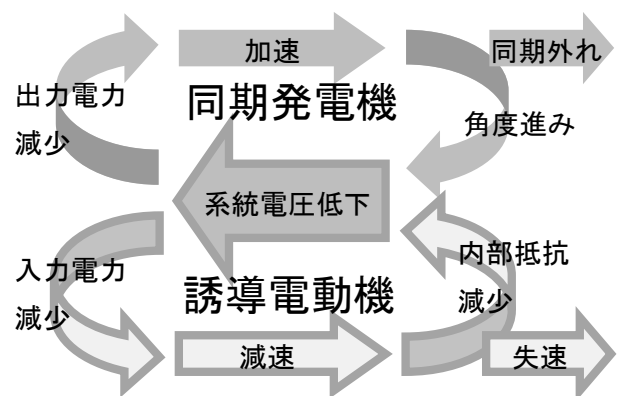


図 5.1(再掲) 安定度が破れるメカニズム

負荷中の誘導機の電圧安定度が最も厳しくなるのは、基幹系統から負荷への下り潮流が最大になるピーク需要時である。従って、本稿で扱うケーススタディのような誘導機の電圧不安定が引金になるケースに限っては、年間を通じてのピーク需要断面のみを考慮すればよい。

FRT, DVS の効能の指標

本稿では RE は需要量に比例して配置した。RE は需要地に近接していることが主要な利点の 1 つなのであるから、その理想を議論の起点とした。比例係数は 0.285 とした。これは全国で 53GW に相当する。結果的に RE 量と SVC 量は比例関係になる。以下、所要 SVC 量は RE 量に対する比率で表現する。

本稿では RE の仕様として次の 3 種類を想定した。

- ① 停止 (Drop) 型：瞬低で停止する。
- ② FRT 型：瞬低で停止しない。なお FRT 継続可能時間は無限大とする。
- ③ DVS 型：瞬低で停止せず、電圧 V のときに(10.1)式の無効電力 Q を発生する。

$$Q = W \left\{ \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 - \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right\} \quad (10.1)$$

ここに W は RE の定格出力、 V は故障中の電圧、 V_0 は故障前の電圧 (初期値) である。この DVS 機能は V が 0.84 において W の 0.582 倍の最大 Q を発生させる。なお、SVC も(10.1)式の特性和とする。その場合、 W は SVC の定格容量である。DVS 型は RE 定格出力の 100% の容量の SVC を有する FRT 型に等しい。

故障は、放射状系統においては最大で、3 相地絡-1 母線 (または回線, バンク) 開放・故障クリア (以下, 3LG-O), ループ系統においては最大で、3 相地絡-ルート遮断・故障クリア (以下, 6LG-O) を想定する。

ケーススタディ

著者の作成した実物系統モデルにおいては、5 つの部分系統において多量の SVC を必要とする顕著な不安定現象が出現した。以下に紹介する。

部分系統 1 構造を図 10.1 に示す。灰色の背景を付した地域には多くの負荷があり、有力なローカル電源がないため、誘導機を含む負荷の電圧回復が遅れる。故障は F1 地点が厳しく、3LG-O を想定した。

停止型 RE の場合に SVC 量を変えた場合の、最も電圧回復の遅い負荷の電圧回復様相を図 10.2 に示す。

FRT 型 RE の場合に SVC 量を変えて計算した結果を図 10.3 に示す。

電圧回復できたケースについて SVC 量/RE 量の比率と故障前電圧の 80% にまで回復に要する時間の関係をプロットすると図 10.4 のようになった。これを 2 次曲線近似して回復時間 1 秒となる SVC

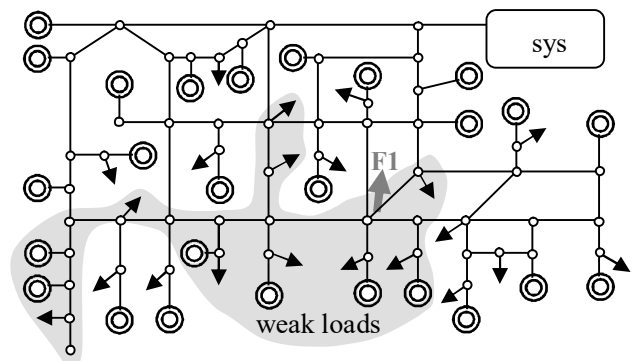


図 10.1 部分系統 1 の構造

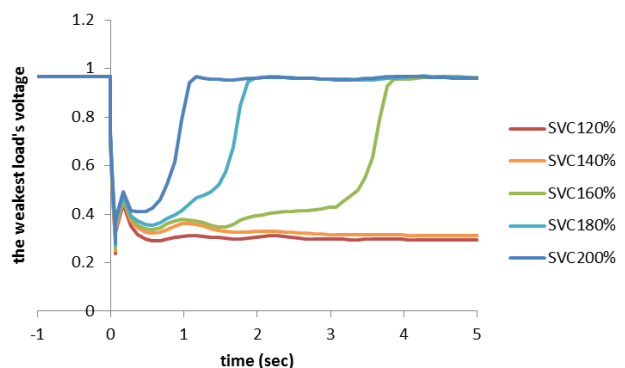


図 10.2 電圧回復様相 (sys1, 停止型)

量を求めると、停止型の場合は RE 量の 201%，FRT 型の場合は RE 量の 50% となった。DVS 型は RE 量の 100% の SVC を内蔵する FRT 型だから、系統側の SVC を必要としない。

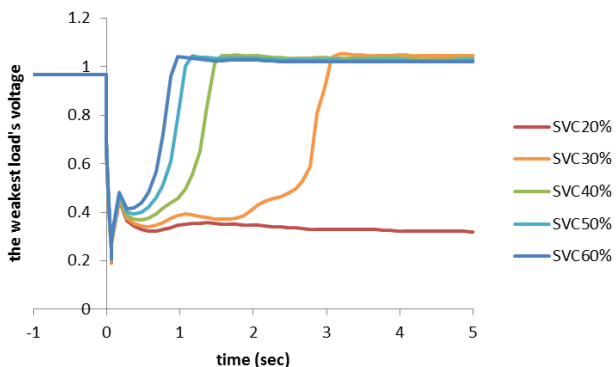


図 10.3 電圧回復様相(sys1, FRT 型)

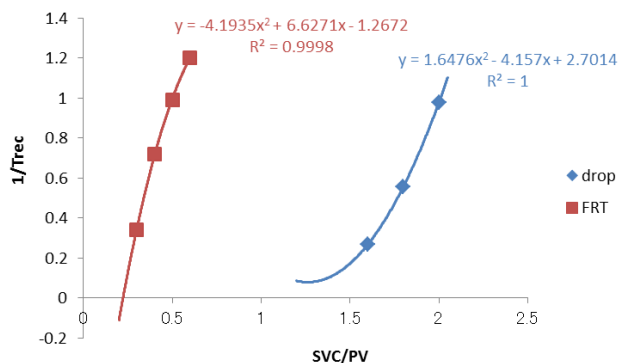


図 10.4 SVC/RE 比と電圧回復時間(sys1)

部分系統 2 構造を図 10.5 に示す。灰色の背景を付した地域には多くの負荷があり、有力なローカル電源がないため、誘導機を含む負荷の電圧回復が遅れる。故障は F1 地点が厳しく、6LG-O を想定した。

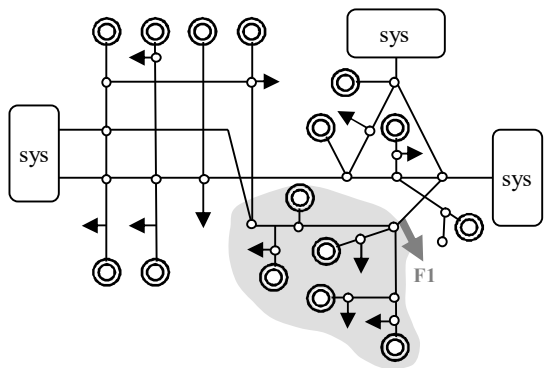


図 10.5 部分系統 2 の構造

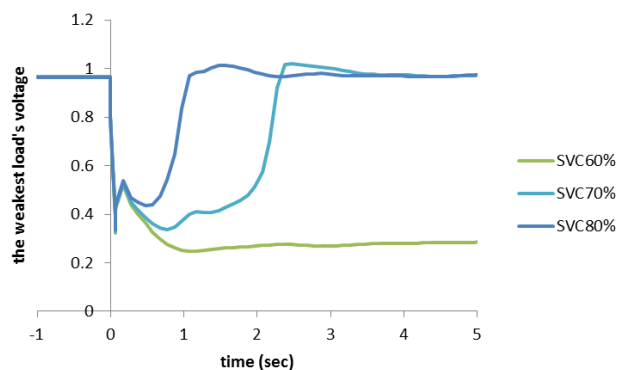


図 10.6 電圧回復様相(sys2, 停止型)

停止型 RE の場合に SVC 量を変えて計算した結果を図 10.6 に示す。

FRT 型 RE の場合に SVC 量を変えて計算した結果を図 10.7 に示す。

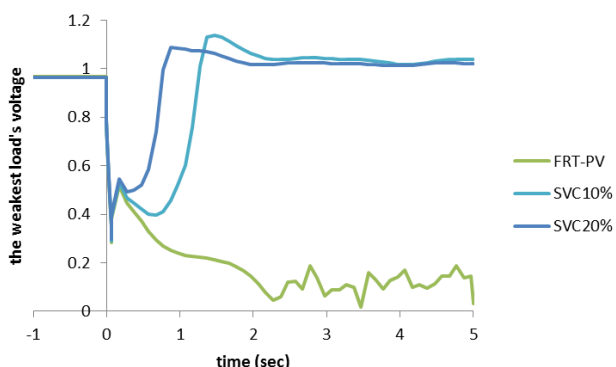


図 10.7 電圧回復様相(sys2, FRT 型)

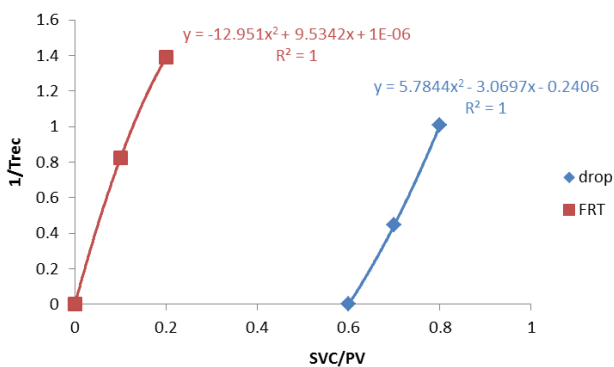


図 10.8 SVC/RE 比と電圧回復時間(sys2)

電圧回復できたケースについて SVC 量/RE 量の比率と故障前電圧の 80% にまで回復に要する時間の関係をプロットすると図 10.8 のようになった。これを 2 次曲線近似して回復時間 1 秒となる SVC 量を求めると、停止型の場合は RE 量の 80%，FRT 型の場合は RE 量の 13% となった。DVS 型は RE 量の 100%

の SVC を内蔵する FRT 型だから、系統側の SVC を必要としない。

部分系統 3 構造を図 10.9 に示す。灰色の背景を付した地域には多くの負荷があり、有力なローカル電源がないため、誘導機を含む負荷の電圧回復が遅れる。故障は F1 地点が厳しく、6LG-O を想定した。

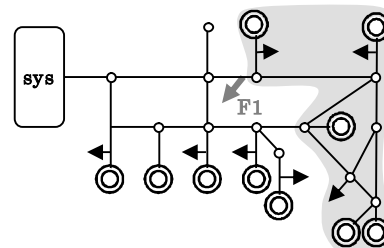


図 10.9 部分系統 3 の構造

停止型 RE の場合に SVC 量を変えて計算した結果を図 10.10 に示す。

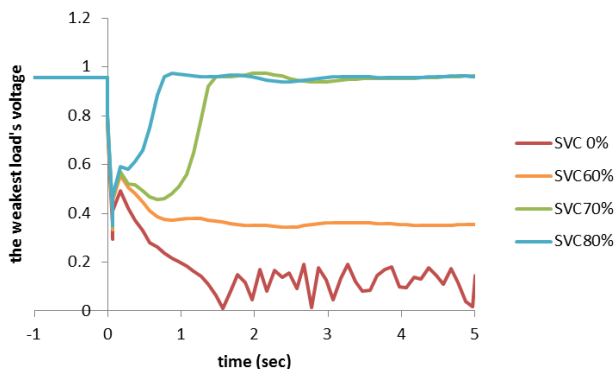


図 10.9 電圧回復様相(sys3, 停止型)

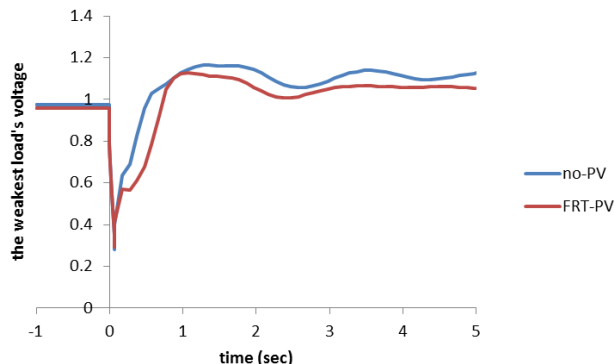


図 10.11 電圧回復様相(sys3, FRT 型)

FRT 型 RE の場合の結果をぞ 10.11 に示す。

電圧回復できたケースについて SVC 量/RE 量の比率と故障前電圧の 80% にまで回復に要する時間の関係をプロットすると図 10.12 のようになった。これを 2 次曲線近似して回復時間 1 秒となる SVC 量を求めると、停止型の場合は RE 量の 73%，FRT 型の場合は RE 量の 0% となった。DVS 型は RE 量の 100% の SVC を内蔵する FRT 型だから、系統側の SVC を必要としない。

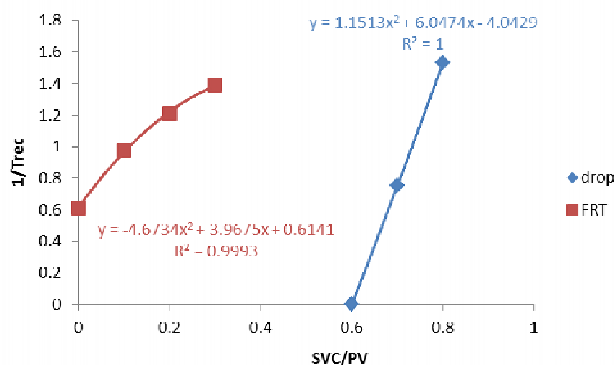


図 10.12 SVC/RE 比と電圧回復時間(sys3)

部分系統 4 構造を図 10.13 に示す。灰色の背景を付した地域には多くの電源があり、同期安定度が厳しい。故障は F1 地点が厳しく、6LG-O を想定した。

停止型 RE の場合に SVC 量を変えて計算した結果を図 10.14 に示す。

FRT 型 RE の場合に SVC 量を変えて計算した結果を図 10.15 に示す。

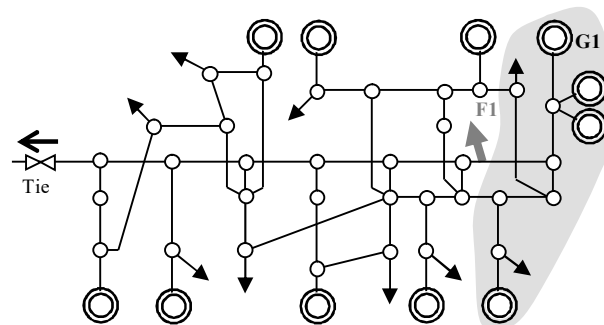


図 10.13 部分系統 4 の構造

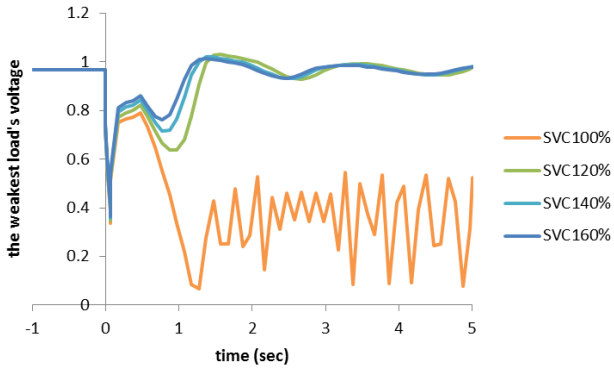


図 10.14 電圧回復様相(sys4, 停止型)

電圧回復できたケースについて SVC 量/RE 量の比率と故障前電圧の 80%にまで回復に要する時間の関係をプロットすると図 10.16 のようになった。これを 2 次曲線近似して回復時間 1 秒となる SVC 量を求めると、停止型の場合は RE 量の 159%, FRT 型の場合は RE 量の 59%となった。DVS 型は RE 量の 100%の SVC を内蔵する FRT 型だから、系統側の SVC を必要としない。

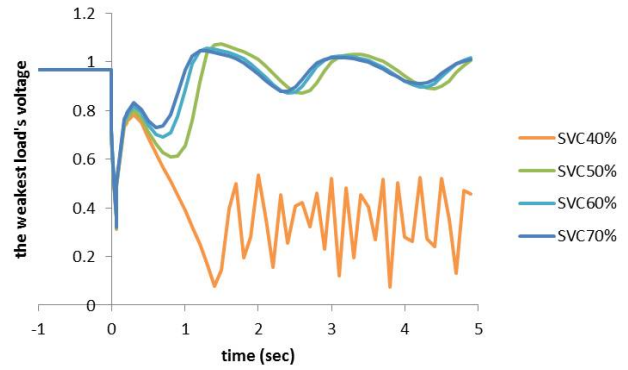


図 10.14 電圧回復様相(sys4, FRT 型)

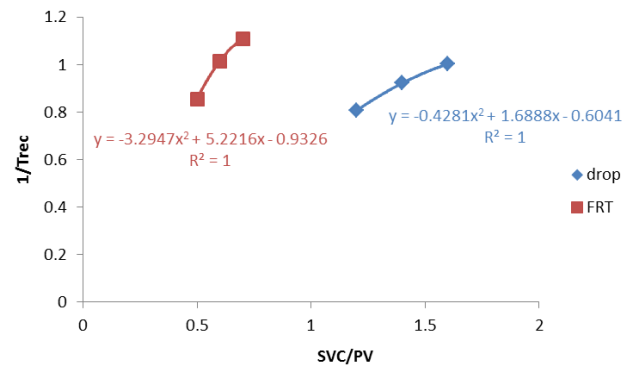


図 10.16 SVC/RE 比と電圧回復時間(sys4)

部分系統 5 構造を図 10.17 に示す。灰色の背景を付した地域には多くの電源があり、同期安定度が厳しい。故障は F1 地点が厳しく、3LG-O を想定した。

停止型 RE の場合に SVC 量を変えて計算した結果を図 10.18 に示す。

FRT 型 RE の場合に SVC 量を変えて計算した結果を図 10.19 に示す。

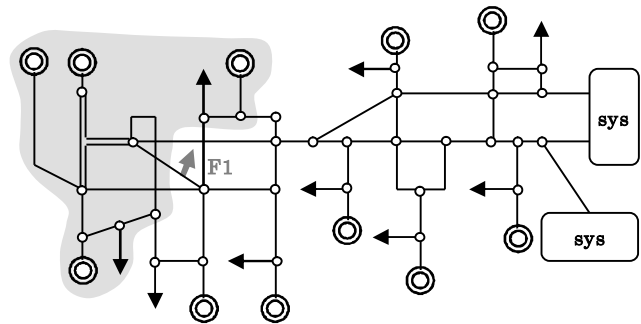


図 10.17 部分系統 5 の構造

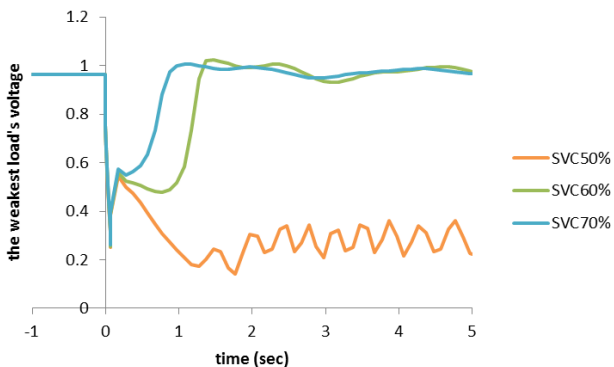


図 10.18 電圧回復様相(sys5, 停止型)

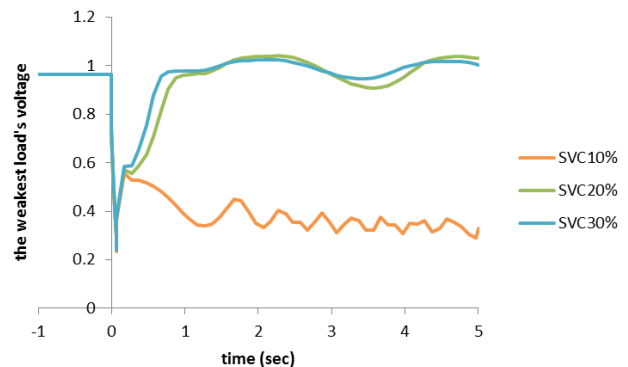


図 10.19 電圧回復様相(sys5, FRT 型)

電圧回復できたケースについて SVC 量/RE 量の比率と故障前電圧の 80%にまで回復に要する時間の関係をプロットすると図 10.20 のようになった。これを 2 次曲線近似して回復時間 1 秒となる SVC 量を求めると、停止型の場合は RE 量の 63%，FRT 型の場合は RE 量の 16%となった。DVS 型は RE 量の 100%の SVC を内蔵する FRT 型だから、系統側の SVC を必要としない

FRT と DVS の価値比較

以上のケーススタディ結果を集約すると表 10.1 の左半分のようになる。ここで SVC の価格を 0.03 十億円/GVA (30 千円/kVA) とすると、例えば部分系統 1 における FRT の価値は

$58.95 \times 0.285 \times (2.01 - 0.50) \times 0.03 = 76.1$ (十億円) と計算できる。また DVS の価値は

$58.95 \times 0.285 \times (0.50 - 0.00) \times 0.03 = 25.2$ (十億円) と計算できる。5 つの部分系統全部での価値は、FRT が 131.9 (十億円)、DVS が 39.2 (十億円) であり、FRT の価値が DVS の価値を大きく上回る。

おわりに

実物系統モデルを用いて RE の FRT と DVS 機能の価値を評価した。FRT 機能の価値は 1.319 兆円で、DVS 機能の価値 0.392 兆円を大きく上回る。従ってわが国の連系規程が FRT 機能のみ要求し DVS 機能までは要求していないことには、合理性がある。

あわせて、適切な実在系統モデルを用いることの必要性と困難性について述べ、困難を解決する一助となる方策を提案し、本稿を例題として実施した。

RE には、現行の連系規程ではまだ要求されていないが、多様な潜在的な能力がある。特にパワーコンディショナーなどのパワーエレクトロニクス機器は、適切な制御を行い、さらに少量の電力貯蔵と組み合わせれば、DVS はもちろん、短周期変動平滑化、ガバナフリー、瞬動予備力、仮想慣性、仮想内部起電力など、電力系統の安定性の向上に多様な貢献をなす。21 世紀中葉をめざして、カーボンフリー kWh 価値にとどまらず、RE の多様な価値を現実のものとして具体化し、高機能 RE が価値に応じた報酬が受け取れるよう、各種の整備をしていく必要があるだろう。

連系規程はその中核をなすものである。現在のように系統保護という比較的限られた観点だけではなく、電力系統への悪影響や貢献を、実在系統モデルをベースにして評価していく技術も取り入れた方がよいことは明白であろう。21 世紀中葉に向けて、制度という法的暴力だけに頼るのではなく、実質的貢献のある方法論によって、低炭素社会の実現に努めていくことが必要と思う。

文献

- (1) 系統連系規程, JEAC 9701 , 2012
- (2) F. Iov, A. D. Hansen, P. Sorensen, and N. A. Cutululis: Mapping of grid faults and grid codes, Riso National Laboratory, Riso-R-1617(EN), 2007

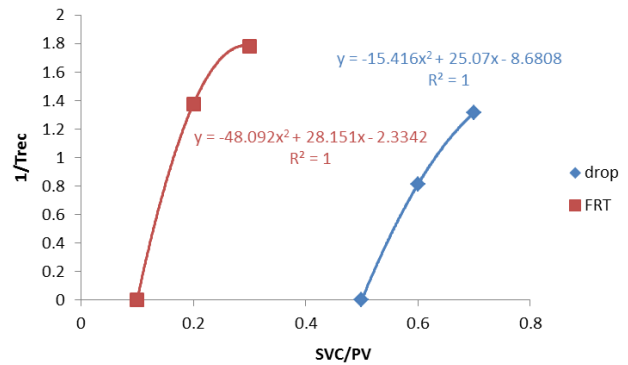


図 10.19 SVC/RE 比と電圧回復時間 (sys5)

表 10.1 必要 SVC/RE 比と FRT・DVS の価値

sys	Demand (GW)	SVC/RE (%)		merit (billion yen)	
		drop	FRT	FRT	DVS
1	58.95	201	50	761.073975	252.01125
2	29.48	80	13	168.87618	32.76702
3	25.58	73	0	159.65757	0
4	13.66	159	59	116.793	68.90787
5	28.05	63	16	112.718925	38.3724
	sum			1319.11965	392.05854

- (3) 駒見, 谷川:「再生可能エネルギーの PCS に搭載する FRT の効能～実物系統モデルで評価することの必要性・難しさ・打開策～」, 電気評論, 101 巻 7 号, pp.61-64, Jul. 2016
- (4) 電気学会調査専門委員会:「電力系統の標準モデル」, 電気学会技術報告, No. 754, 1999
- (5) 三ッ木, 横山, 山田, 谷川:「PV が大量導入された電力系統の過渡安定性向上に寄与する PV の出力制御に関する研究」, 電学論 B, 136 巻 1 号, pp.44-52, 2016
- (6) Y. Yamagishi and S. Komami: “Practical Power System Aggregation Considering Dynamic Loads”, IEEJ Trans. PE, Vol.128, No. 2, pp.381-387 (2008)
- (7) 水尾, 駒見:「電力系統におけるモータ負荷のパラメータ同定精度向上」, 電学論 B, 132 巻 1 号, pp.71-76, 2012
- (8) 駒見:「電力系統モデルの検証の重要性について」, 電学誌, Vol.132, No.12, pp.820-823, 2012