

## 4. 電圧安定度と RE の設計

第 2, 3 章では従来の系統モデルが実現を再現できないこと、再現するためにはモーターを模擬した動的負荷モデルと Y 結線縮約法が必要なことを導きました。再現すべき実現現象として用いたのは非常に頻繁に発生する瞬時電圧低下（瞬低）でした。実は正しい系統モデルを必要とするのは系統安定度の計算です。安定度が系統運用を最も強く制約しているからです。

系統安定度には大別して 3 種類あります。第 1 は純負荷系統の電圧安定度、第 2 は同期発電機の同期安定度、第 3 は同期発電機の動揺安定度です。3 種類の安定度に系統モデルが大きく影響することを示します。また再生可能エネルギー（RE）の設計が安定度に影響することを示し、RE と系統トータルでの経済性を実現する方法を考えます。まず第 3 章で電圧安定度を扱います。

### 瞬低を伴わない電圧安定度（定態電圧安定度）

電圧安定度が破れる現象を電圧崩壊といいます。凄いな言葉です。ここではまず瞬低を伴わない電圧安定度を扱います。1987 年 7 月 23 日の関東西部大停電が、このタイプです。

電圧崩壊には大別して 2 種類あって、第 1 が変圧器タップ制御の逆効果に起因する「遅い電圧崩壊」、第 2 がモーターのストール（Stall, 失速）現象に起因する「速い電圧崩壊」です。これら 2 種類の電圧崩壊を再現できる最も簡単な系統モデルを図 4.1 に示します。

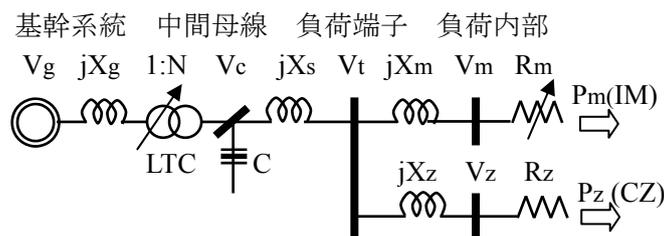


図 4.1 遅いおよび速い電圧崩壊を再現する最小モデル

基幹系統は電圧源  $V_g$  と内部リアクタンス  $X_g$  で、モーター（IM）負荷は定内部リアクタンス  $X_m$  背後の可変抵抗  $R_m$  で、定インピーダンス（CZ）負荷は定リアクタンス  $X_z$  と定抵抗  $R_z$  の直列で表現します。LTC（on-Load Tap Changer, 負荷時タップ変換器）つき変圧器は可変タップ  $1:N$  で表現し、変圧器のリアクタンスは  $X_g$  に含めます。中間母線には多量のコンデンサ  $C$  があります。

この系には動的要素が 2 つあります。1 つは LTC の可変タップ、もう 1 つは IM 負荷の内部抵抗です。前者はタップ動作の不安定による「遅い電圧崩壊」を生じさせ、後者は IM のストール（Stall, 失速）による「速い電圧崩壊」を生じさせます。現実の電力系統に発生しうる電圧不安定現象にはこれら 2 つがあり、図 4.1 はその両方を再現できるモデルとなっています。

まず「遅い電圧崩壊」に至らない限界を求めてみます。普通、変圧器タップを上げれば変圧器二次側電圧は上昇します。ところが系統に加わるストレスがもっと強くなると、変圧器タップを上げると変圧器二次側電圧が低下するという「タップ逆効果現象」が生じるようになります。ここではローカル系統の例題として、ある 1 次変電所をとりあげ、これに供給する 154kV 送電線 2 回線のうち 1 回線が停止する故障を想定します。回路構成は図 4.1 と同じであり、諸元は以下の通りです。この例題は電圧安定度が悪いことで定評ある系統で、著者も深くかかわったものゆえ、

親しみがありません。

$$\begin{aligned} V_g &= 1.01 & X_g &= 0.8132 \text{ (2 回線時)} & X_g &= 1.318 \text{ (1 回線時)}, \\ N_0 &= 1.0 & V_c &= 1.0 & C &= 0.313029 & X_s &= 0.5578, \\ X_m &= 0.09/P_m & R_m &= 1.675036 & X_z &= 0.09/P_z & R_z &= 1.675036 \end{aligned}$$

送電線が 2 回線から 1 回線になったとき ( $X_g$  の増加で模擬します), 中間母線電圧  $V_c$  は LTC タップ  $N$  によって変化します。負荷消費電力が負荷端子電圧によって変わらないと仮定してタップと電圧の関係を求めると図 4.2 のようになります。エレガントな解析法の部類で,  $N$ - $V$  カーブといいます。この事例で注目すべきはタップを上げていくと, ある所までは電圧が上昇しますが, さらにタップを上げると電圧が低下し始めることです。故障により電圧は一旦低下しますから, もしタップを上げることで故障前の電圧 1.0 に回復できれば, タップ動作はそこで終了し, 何の不都合もありません。しかし故障前の電圧 1.0 にまで回復できない場合, タップはむなしく動作を続行し, 皮肉にも電圧は低下していきます。これが「遅い電圧崩壊」です。この例では負荷が 0.44GW では安定, 0.46GW では不安定と判別できます。

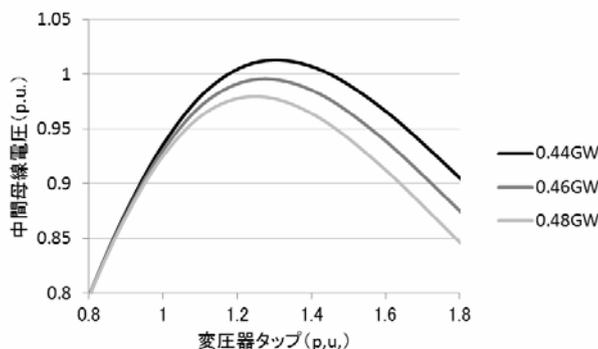


図 4.2 送電線 1 回線停止時の  $N$ - $V$  カーブ

図ではタップ  $N$  の目盛を 0.8 から 1.8 までとっていますが, こんな広いタップ範囲をカバーする LTC などありません。普通は 0.9 から 1.1 くらいのもので。しかし負荷系統には一次変電所の LTC と直列に配電用変圧器の LTC があるので, 2 段の LTC により 0.8 から 1.2 くらいのタップ比は実現できます。タップが上限に達すればそこでタップ上昇は停止し, その後は負荷それ自体の電圧感度により電圧が決まります。

もちろん腕ずくの解析法, つまりシミュレーションも可能であり, 代表的なツールに電力中央研究所の  $V$  法があります。一般的には長時間電圧シミュレーションなどと呼ばれます。これは 1 秒程度の刻み時間で潮流計算を繰り返すもので, 変圧器のタップ変動を考慮しますが, 負荷は次式のように静的な電圧・周波数感度だけが考慮されます。このような負荷モデルを指数モデルといい, 静的負荷モデルに属し, わが国では広く用いられています。ローカル系統の場合は周波数感度  $\gamma$ ,  $\delta$  は特に考慮する必要はありません。通常,  $\alpha$  は 1.0,  $\beta$  は 2.0 が用いられています。これは変圧器タップ変化などの小幅な電圧変動に伴う負荷のゆっくりした応答を観測して求めたもので, 遅い電圧崩壊の解析にはこれで十分でしょう。

$$P = P_0 (V / V_0)^\alpha (f / f_0)^\gamma, Q = Q_0 (V / V_0)^\beta (f / f_0)^\delta$$

同じ事例を長時間電圧シミュレーションで解析した結果を図 4.3 に示します。この例では通常

用いられる $\alpha = 1.0$  では収束不良が発生するので、 $\alpha = 1.2$  としました。こういうことは滅多にないのですが、従来、負荷は中間母線に直付けされ、負荷端子までのリアクタンス  $X_s$  が無視されるのに対し、本例ではこれを考慮しているためではないかと思えます。

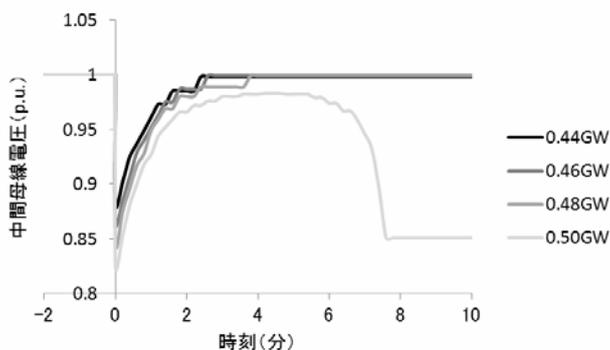


図 4.3 長時間電圧シミュレーション

安定限界は 0.48GW となり、N-V カーブによる解析結果よりも少し安定となっています。差異の第 1 の理由は、N-V カーブでは負荷を定電力としたのに対し、長時間シミュレーションでは負荷に正の電圧感度 ( $\alpha = 1.2$ ) を持たせていることです。電圧感度のために、電圧が低下すると負荷消費電力が少し減少し、系統は少し楽になります。差異の第 2 の理由はタップ制御に不感帯があることです。これは頻繁なタップ動作を回避するために必要なものです。これにより電圧が僅かに低い程度ではタップは動作しなくなります。この 2 つの理由の相乗効果で、N-V カーブでは不安定だった 0.46GW と 0.48GW のケースが、ぎりぎり安定となるわけです。

0.50GW のケースでは遅い電圧崩壊になっています。現象の時間レンジは分のオーダーです。それゆえ遅い電圧崩壊と呼ばれます。しかし不安定と言っても電圧は 0.85 あたりで下げ止まっております。これは変圧器タップが上限に達したためです。しかし、もし下位の配電用変圧器のタップまで考慮すると、電圧はもっと低下するでしょう。

次に「速い電圧崩壊」に至らない限界を求めてみます。最も簡単でエレガントな解析法は P-V カーブです。図 4.1 のようにモーターと定インピーダンスを区別して扱い、モーターの内部抵抗を変えたときのモーター電圧とモーター消費電力の関係を計算します。今までと同じ例での計算結果を図 4.4 に示します。図に縦線で示したのはモーターの機械的パワーで、これは電圧に無関係です。P-V カーブがこの機械的パワーの縦線と交差すれば平衡点があるということです。平衡点は、あるとすれば 2 つあり、電圧が高い方を「高め解」、低い方を「低め解」と呼んでいます。

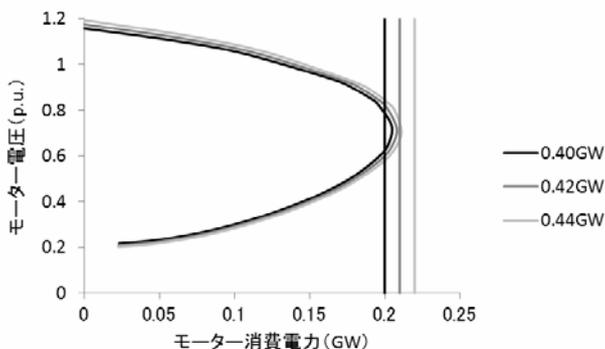


図 4.4 負荷自身の不安定を示す P-V カーブ

この例では負荷の 50% がモーターであるとしています。負荷が 0.40GW では平衡点が 2 個あり

安定ですが、0.42GW になると平衡点がなくなり、これは不安定を意味します。モーターは内部抵抗を下げることで機械的パワーに見合った電力を消費しようとはしますが、かなえられず、更に内部抵抗を下げていきます。最後には非常に低い電圧になってしまい、このとき回転数は非常に小さくなっています。これがストール（失速）です。N-V カーブ、長時間電圧シミュレーションより不安定になっているのは、モーター内部のリアクタンス  $X_m$  を考慮に入れて計算しているからです。しかしこの説明は P-V カーブが与える情報の範囲からはみ出しており、それをモーターの物理という電気工学の知見で補っています。専門にしていない人には想像がつかないと思いますので、もう少し説明を深めてみます。

モーターの機械的負荷トルク  $T_m$  は次式のように、回転数  $\omega$  の  $n$  乗と表現されます。多くの場合、 $n$  は 2 です。 $T_{m1}$  は同期速度 ( $\omega = 1$ ) のときの機械的負荷トルクです。普通モーターは同期速度より僅かに低い回転数で運転しています。

$$T_m = T_{m1} \omega^n$$

モーターの内部抵抗  $R_m$  は回転数  $\omega$  によって次式のように変化します。これは電気機器の知見によります。 $R_{m0}$  は定格回転数  $\omega_0$  のときの内部抵抗です。

$$R_m (1 - \omega) = R_{m0} (1 - \omega_0)$$

モーターの内部抵抗  $R_m$  がわかれば電力系統から供給されるパワー、つまり電気的入力トルク  $T_e$  が計算できます。 $T_e$  から  $T_m$  を差し引いた余剰のトルクはモーターを加速するのに使われます。このときモーターの慣性  $M_m$  が加減速を時間的に遅らせるよう作用します。式で表現すれば次のようになります。

$$M_m d\omega = T_e - T_m$$

この式を解くにはシミュレーションによることになりますが、そうしなくてもある程度ことは分かります。モーターの加速トルクと回転数の関係を描けばよいのです。同じ例での計算結果を図 4.5 に示します。

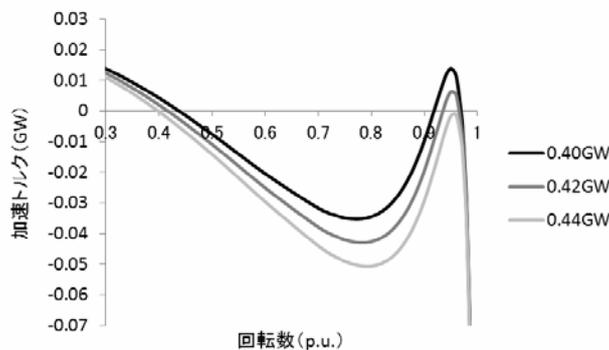


図 4.5 モーターの加速トルク-速度カーブ

負荷が 0.40GW の場合と 0.42GW の場合には加速トルクがゼロになる回転数が 3 箇所あります。このうち中央の点は不安定平衡点です。なぜなら、もし回転数が少し上昇すると加速トルクが正になるから益々加速されます。これに対して両端の 2 点は安定平衡点です。右側の回転数が 1 に近い点が正常に運転している状態で、左側の回転数が非常に低い点がストールした状態です。負

荷が 0.40GW と 0.42GW の場合は正常な運転が成り立つので、安定といえます。ところが負荷が 0.44GW に増えると、右側の正常運転を示す平衡点と不安定平衡点の 2 個が消滅し、ストールを示す左側の平衡点だけが残ります。こうなると最初の状態がどうであれ、モーターはストール状態へとまっしぐらに突き進んで生きます。これがモーター負荷自体の不安定、つまり「速い電圧崩壊」です。

この現象は短時間シミュレーションで演じて見せることができます。これは同期発電機の同期・動揺安定度の計算に用いるツールですが、モーター負荷も用意されているので、速い電圧崩壊のシミュレーションに流用できます。代表的なツールに電力中央研究所の Y 法があります。計算結果を図 4.6 に示します。負荷が 0.40GW と 0.42GW の場合は、送電線 1 回線停止によって電圧は下がるものの、崩壊といえるほどには低下しません。しかし負荷が 0.44GW に増えるとモーター電圧は極端に低くなります。これはモーターの回転数が極度に低下し、ストール状態に陥ったことを示しています。この不安定現象は秒の時間オーダーで生じているので速い電圧崩壊とよばれます。短時間シミュレーションの結果はトルク - 速度カーブによる解析結果とぴったり一致しています。

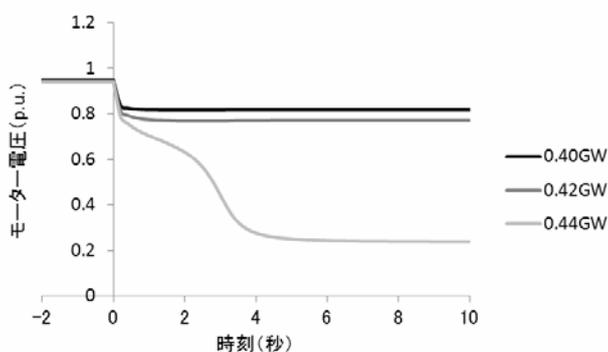


図 4.6 短時間シミュレーション

以上、同じローカル負荷系統のデータを用いて、遅い電圧崩壊で 2 種類（濃い灰色）、速い電圧崩壊で 3 種類（薄い灰色）の解析を行いました。それらの安定限界負荷量を比較すると図 4.7 のようになります。速い電圧崩壊の方が、安定限界負荷量が小さくなっています。わが国では遅い電圧崩壊はよく解析されますが、速い電圧崩壊が解析されることは稀です。しかしモーターが 50% も存在する以上、故障を伴わない電圧安定度の限界を決めるのはモーターによる速い電圧崩壊であり、遅い電圧崩壊のように見えても、引金を引くのはモーターではないかと思えます。

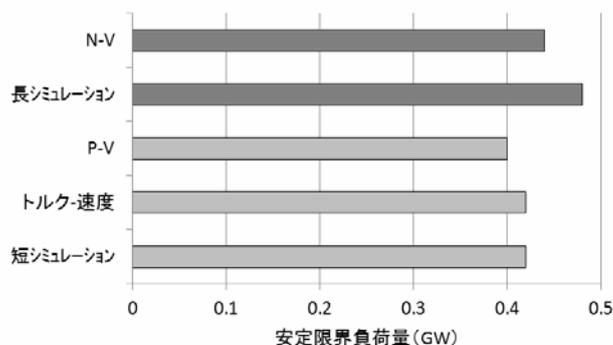


図 4.7 瞬低を伴わない電圧安定限界の比較

## 瞬低を伴う電圧安定度（過渡電圧安定度）

これまででは2回線送電線の1回線停止を扱いましたが、本節では3相地絡により1回線が停止するものとします。3相地絡では電圧がゼロまで低下することがあります。そうなると負荷中のモーターは系統から全くパワーを受けられません。他方、機械的負荷は一定のパワーを消費します。モーターは自らの回転エネルギーを放出することでこのミスマッチを解消します。例えば、機械的負荷はモーター容量の50%、モーターの慣性は0.5秒、瞬低は100%深さが0.1秒続くとします。瞬低の間にモーターは

$$\frac{0.1 \text{ 秒}}{0.5 \text{ 秒} / 50\%} = 10\%$$

だけ減速します。故障前に回転数が0.977だったとすれば、故障クリアの瞬間には回転数は0.877にまで落ちていることとなります。瞬低によるモーターの減速は負荷自体の不安定を促進する方向に作用します。送電線1回線が停止する場合には何らかの故障が伴うのが当然であり、実用上の安定限界負荷量はもっと小さなものになるはずで

まずトルク - 速度カーブを描いてみます。故障クリア直後の回転数が0.877であるとして、このときの加速トルクが正であれば正常な運転状態に回復します。負ならばストール状態に陥ります。結果を図4.8に示します。負荷が0.32GWおよび0.34GWのとき回転数0.877での加速トルクは正で、安定です。負荷0.36GWのとき、回転数0.877での加速トルクは僅かに負で、不安定です。瞬低によるモーターの減速があるので、瞬低がない場合に比べて安定限界の負荷量は、ずっと小さくなります。

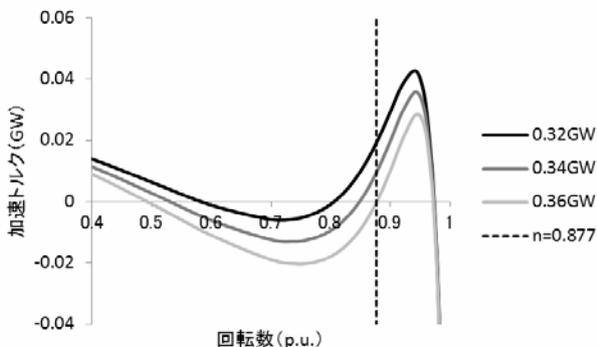


図 4.8 トルク - 速度カーブ

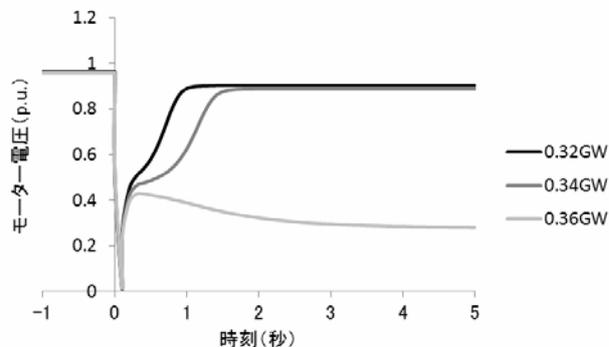


図 4.9 短時間シミュレーション(IM、Y 結)

同じ例で短時間シミュレーションを行ってみます。結果を図4.9に示します。負荷が0.32GWおよび0.34GWのときモーター電圧は正常に回復します。負荷が0.36GWのときモーター電圧は異常に低下したまま回復せず、ストールに至っています。安定限界の負荷量はトルク - 速度カーブによる解析とぴったり一致しています。

系統モデルが異なれば解析結果が大きく異なってきます。電力系統モデルとして

負荷：モーター負荷／静的負荷、

縮約：Y 結線法／伝統法

の、都合 $2 \times 2 = 4$ ケースで模擬してシミュレーション結果を比較します。モーター負荷でY結線法のケースは既に図4.9に示しましたから、他の3ケースを図4.10から図4.12に示します。静的負荷でY結線法のケースでは安定限界負荷量は0.48GWと、非常に大きくなります。モーター負

荷で伝統法のケースでも安定限界負荷は 0.46GW と非常に大きくなります。静的負荷で伝統法のケースに至っては、安定限界負荷は 0.64GW と、タップ安定限界よりも大きくなってしまいます。勿論、図 4.12 のモーター負荷で Y 結線法だけが真実で、他の 3 ケースは嘘なのですが、嘘の 3 ケースでは電圧安定限界が非常に大きく、楽観的な評価になっていることに注意すべきでしょう。

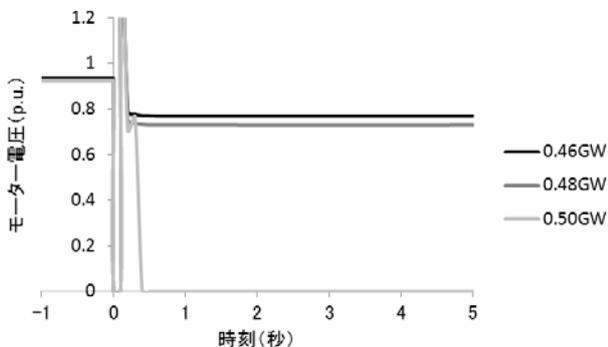


図 4.10 短時間シミュレーション(静的、Y 結)

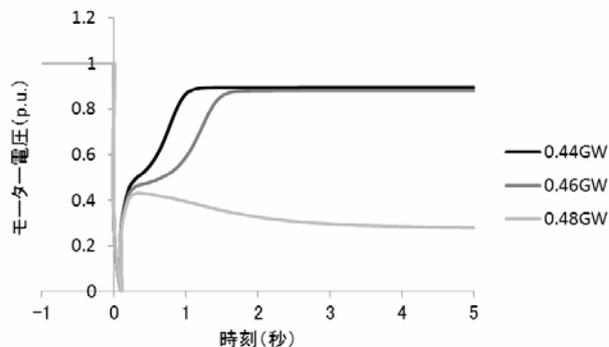


図 4.11 短時間シミュレーション(IM、伝統)

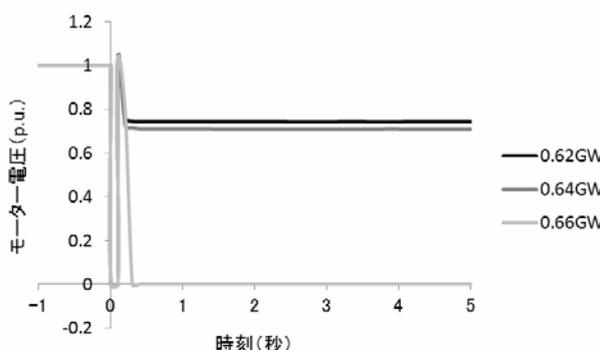


図 4.12 短時間シミュレーション(静的、伝統)

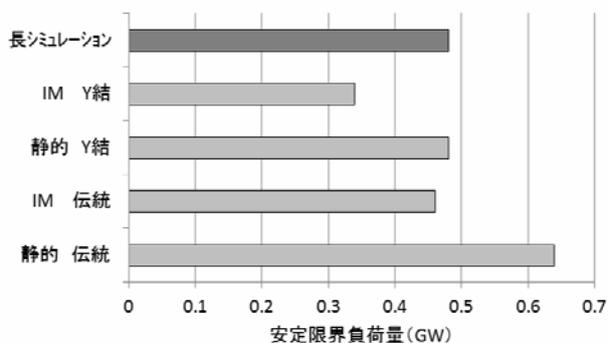


図 4.13 系統モデルによる電圧安定限界の違い

以上の結果を、参考として遅い電圧崩壊（長時間シミュレーション）も含めて比較すると、図 4.13 のようになりました。静的負荷モデルまたは伝統的縮約法を使い続けていると、瞬低を伴う電圧安定度による限界負荷量は長時間シミュレーションによる遅い電圧崩壊現象による限界と大差ない水準に、誤って楽観的に評価されてしまいます。正しい評価のためにはモーター負荷、Y 結線縮約法を採用する必要があるのですが、従来はそういう系統モデルが使われてこなかったため、瞬低を伴う電圧安定度問題が看過されてきたといえるでしょう。

系統モデルは現実を忠実に反映したモーター負荷と Y 結線縮約法を用いるとして、もう 1 つ注意すべきは、第 2 章での分析によれば、十分深い瞬低では負荷の約 30% が停止することです。停止するのはモーター以外の負荷ばかりのようです。一部の負荷が停止すれば、モーターのストールは生じにくくなるはずです。

瞬低でモーター以外の負荷の 60%（モーター比率が 50% だから全負荷の 30% に相当）が停止すると仮定してトルク - 速度カーブを描くと図 4.14 のようになりました。故障直後にモーター回転数が 0.877 に低下しているとして、負荷量 0.38GW および 0.40GW のときは加速トルクが正で安定です。負荷が 0.42GW では加速トルクが負となり不安定です。安定限界負荷量は一部負荷停止を考慮しない場合に比べて少なからず増大します。

短時間シミュレーションの結果は図 4.15 となりました。負荷量が 0.40GW まではモーター電圧が正常に復帰します。負荷量 0.42GW ではストールしています。短時間シミュレーション結果は

トルク-速度カーブによる解析結果とぴったり一致しています。

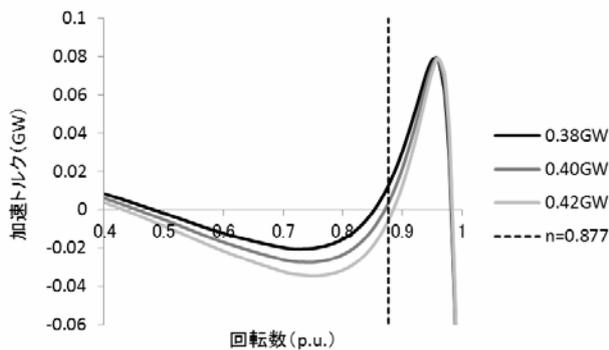


図 4.14 一部負荷停止時の加速トルク

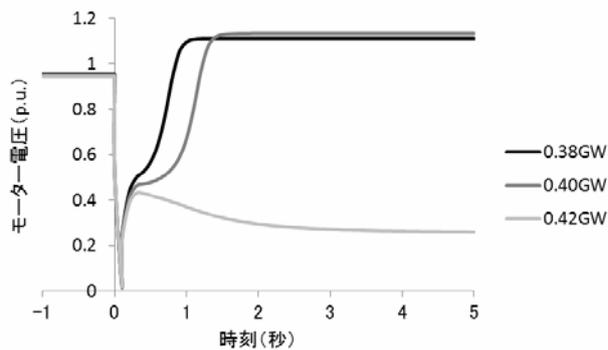


図 4.15 一部負荷停止時の短時間シミュレーション

この現象をもし P-V カーブで解いたなら、図 4.16 のようになり、どのケースも安定ですが、明らかに真実と異なります。これはそもそも P-V カーブという技法が瞬低によるモーターの減速も、そこから回復しうるか否かの判断も、扱うことのできない手法だからです。P-V カーブは大成功を収めた優れた解析技法であることは否定しませんが、電圧安定度なら何でも P-V カーブで説明できるわけではありません。

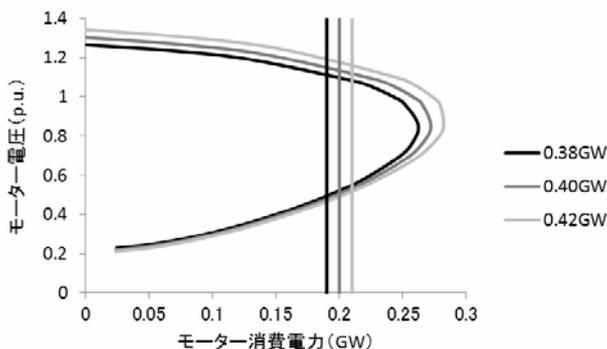


図 4.16 一部負荷停止時の P-V カーブ

以上、ローカル純負荷系統の電圧安定度を色々な観点から検討しました。観点を異にする 4 つの電圧安定限界負荷量を図 4.17 に比較しました。遅い電圧崩壊の安定限界は 0.48GW でした。瞬低なしの速い電圧崩壊では 0.42GW に減少しました。瞬低を伴う場合は 0.34GW と、大幅に減少しました。瞬低でモーター回転数が 10%低下することの影響は想像以上に大きなものでした。そこへ瞬低による 30%の負荷停止を考慮すると安定限界は 0.40GW に増加します。

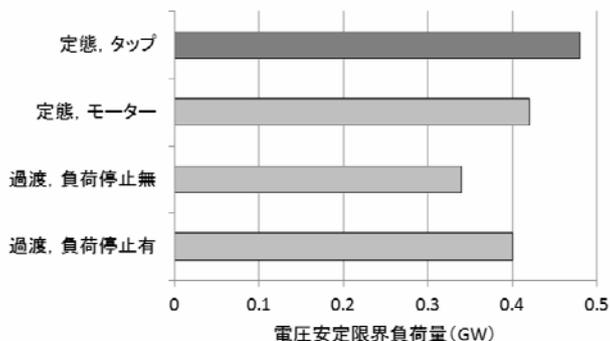


図 4.17 ローカル系統の電圧安定度の総括

## RE の設計による電圧安定度の違い

これでようやく電圧安定度が正しく計算できる条件が整いました。再生可能エネルギー（RE）の大量普及が電圧安定度に及ぼす影響が評価できます。RE の設計は次の3種類を想定します。

「停止型」RE は瞬低で一時停止します。再並列するまでに電圧崩壊が起きるかもしれません。

「FRT 型」RE は瞬低で停止しません。しかし瞬低後の系統電圧回復を支援しません。

「DVS 型」RE は瞬低で停止せず、瞬低後の系統電圧の回復を支援します。

FRT とは Fault Ride-Through の略で、瞬低乗り切りとでも直訳しましょうか。DVS とは Dynamic Voltage Support の略で、動的電圧支持とでも直訳しておきます。瞬低で停止しない RE の瞬低後の動的特性は次式のように表現しておきます。

$$G_{RE} = G_{RE0},$$

$$B_{RE} = Y_{RE0} \{ (V_c / V_{c0})^2 - (V_c / V_{c0})^{2+K} \}$$

有効電力はコンダクタンス  $G_{RE}$  一定と仮定しています。もちろん、電流一定、電力一定という制御もありうるのですが、故障に伴う系統電圧低下時にも電力一定制御を押し通すことには無理があり、その点、コンダクタンス一定制御には無理な所がありません。

無効電力は電圧で変化するサセプタンスとして扱います。 $Y_{RE0}$  は定格出力時のアドミタンスです。この様子を図 4.18 に示します。FRT 型は  $K=0$  で、無効電力はいかなる電圧においてもゼロです。DVS 型では  $K$  は 2 より大きな値をとり、 $K$  が大きいほど電圧維持能力が発揮されます。しかし些細な電圧変動であまり大きな無効電力変動を生じないように、ここでは  $K$  は 5~10 とします。この DVS は、実は、パワーコンディショナーの電流容量を十分に活用しきっていません。徹底的に電流容量を活用した「骨までしゃぶる」設計も当然可能ですが、本書では、この程度の「軽い」DVS でも劇的な効果があることをお見せしようと考えた次第です。

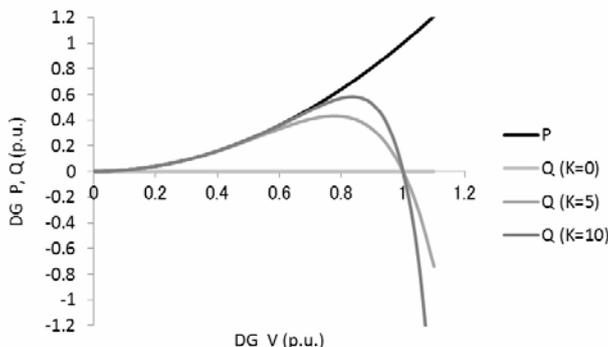


図 4.18 DVS 型 RE の電圧－出力特性

RE は負荷端子に並列接続します。これは低圧需要家を主体に大量導入されることが期待されている太陽光発電（Photovoltaic, PV）を念頭に置いたからです。RE 出力は負荷の 20% とします。負荷はモーター 50% と定インピーダンス 50% の混合とします。故障は 2 回線送電線のうち 1 回線の 3 相地絡 - 停止を想定し、故障除去時間は 0.1 秒とします。瞬低による一部負荷停止は 30% とします。RE なしの場合は既に図 4.14 および 4.15 に示しました。

負荷の 20% の RE が普及しその設計が停止型、FRT 型、DVS 型の場合の短時間シミュレーションの結果を図 4.19 から 4.21 に示します。加速トルク - 速度カーブと短時間シミュレーションがぴったり一致することはこれまでの事例でわかっていますから、シミュレーションのみ示します。

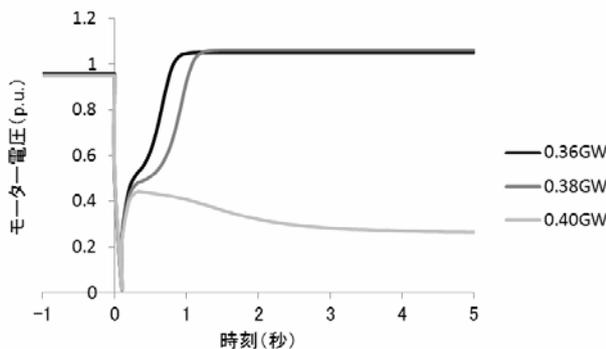


図 4.19 短時間シミュレーション(停止型 RE)

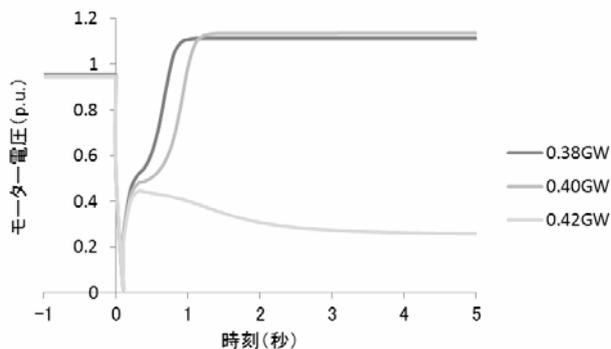


図 4.20 短時間シミュレーション(FRT 型 RE)

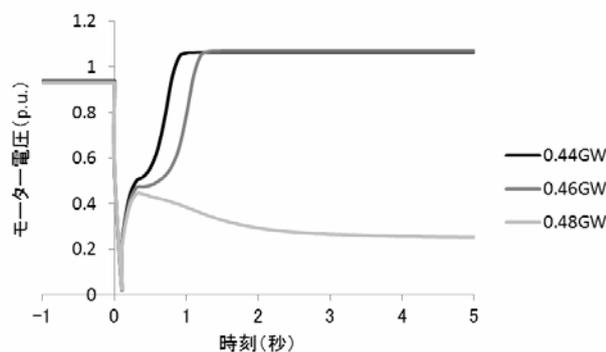


図 4.21 短時間シミュレーション(DVS 型 RE)

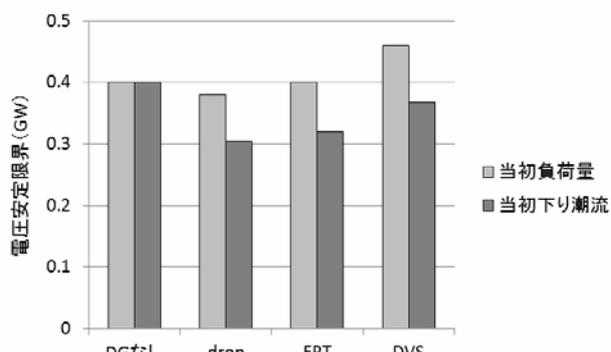


図 4.22 RE の設計による電圧安定限界の変化

電圧安定限界を「当初負荷量」と「当初下り潮流」で評価した結果を図 4.22 に示します。DVS 型は当初負荷量という評価尺度で見ると、RE なしの場合を上回り、優秀と評価されるかもしれませんが。しかし当初下り潮流という評価尺度で見ると RE なしの場合に及ばないことには十分注意する必要があります。つまり、DVS 型であっても、RE の流通設備コスト低減の効能をフルマークでは評価できないということです。

### 基幹系統の解析事例

これまでは 154kV 送電線 2 回線で受電する純負荷 1 次変電所というローカル系統を扱ってきました。これは電圧安定度という広い問題を理解するための簡単な例題として適当と考えたからです。解析も簡単で、読者が追試するのも容易です。意外にも真実が知られていないことも理解できたと思います。しかし本当の問題は基幹系統の電圧安定度です。現実を踏まえた系統模擬をすると、基幹系統のあちこちで問題がありそうなことが分かりました。その全部を紹介することはできませんが、2 例ばかりを紹介したいと思います。

**【小規模な基幹系統の例】** 構造を図 4.23 に示します。外部系統と 3 点で連系し、大量の電力を受電しています。一番右の 2 回線連系線の 1 回線が F1 地点の 3 相地絡で停止します。故障除去時間は 0.07 秒とします。負荷は例によってモーター 50% と定インピーダンス 50% の混合です。瞬低による一部負

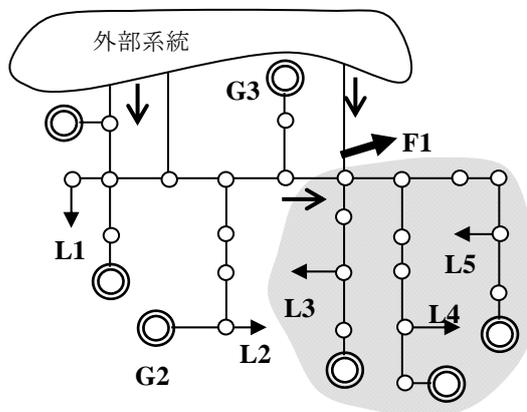


図 4.23 小規模基幹系統の構造

荷停止は当然考慮しますが、考慮しない場合も参考としてケースに含めます。負荷停止率は各負荷における瞬定深さから定めます。薄い灰色の背景を付した部分は、放射状系統としてはかなり大きなものです。外部と連系する部分で3相故障が起きるので、深い瞬低に見舞われ、速い電圧崩壊が心配されます。

シミュレーション結果を図4.24から4.26に示します。伝統的縮約法・負荷停止なしの場合は全ての負荷の電圧が非常に速く回復しており、電圧崩壊の気配は全く感じられません。Y結線縮約法・負荷停止なしの場合は負荷L3とL5が速い電圧崩壊に至っています。Y結線縮約法・一部負荷停止の場合は全ての負荷が割合短時間に電圧回復していますが、回復しすぎて電圧が高めになります。これは一部負荷停止により負荷自体の無効電力が減少するとシステムの無効電力ロスが減少するためです。電圧が120%を超えると変圧器の飽和が始まり、系統に多量の高調波が流出し、コンデンサの損傷やリレーの誤動作などの悪影響が生じますが、この例ではそこまで深刻ではありません。系統モデルの正確さが計算結果に多大な影響を及ぼします。

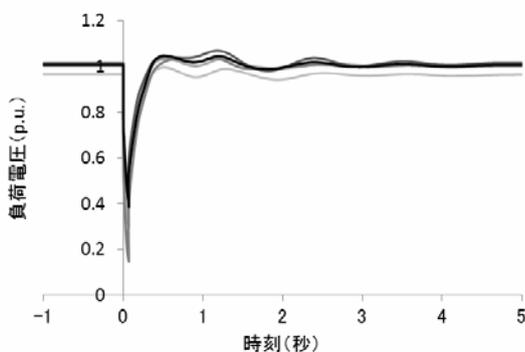


図 4.24 シミュレーション(伝統, 負荷停止なし)

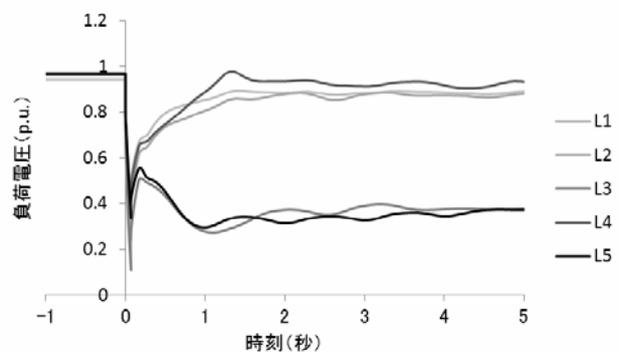


図 4.25 シミュレーション(Y結, 負荷停止なし)

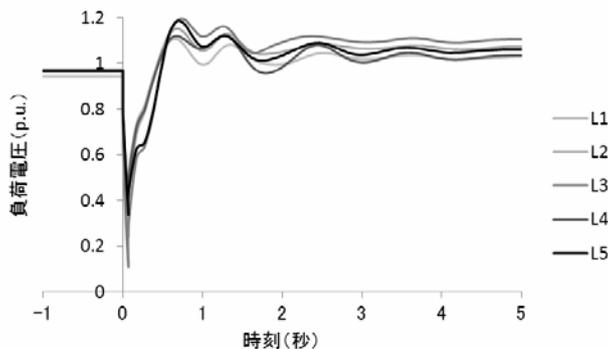


図 4.26 シミュレーション(Y結, 一部負荷停止)

そこへ先に紹介した3種類の設計のREを負荷の20%導入します。需給バランスをとるため一部の火力を停止します。瞬低による一部負荷停止は模擬します。REなしの場合のシミュレーション結果は既に図4.26に示しました。REありの3ケースのシミュレーション結果を図4.27から4.29に示します。停止型REの場合は灰色の部分の負荷L3からL5に加えて外部のL1, L2も電圧崩壊に至っています。FRT型REの場合は電圧崩壊には至りませんが、電圧回復に要する時間が長く、瞬低後の電圧は高めになります。DVS型REの場合は電圧回復が速く、瞬低後の過電圧がかなり緩和されています。

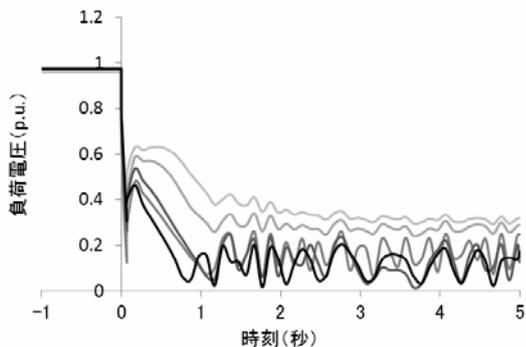


図 4.27 シミュレーション(停止型 RE)

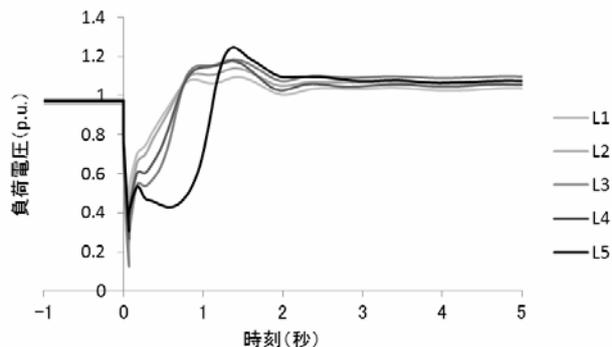


図 4.28 シミュレーション(FRT 型 RE)

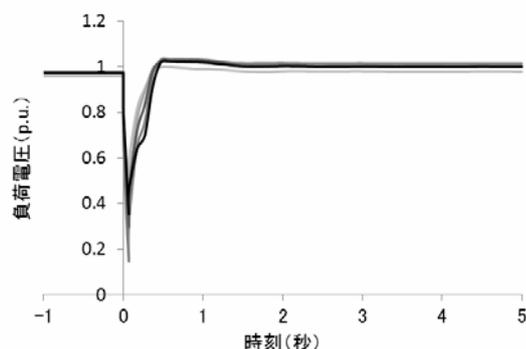


図 4.29 シミュレーション(DVS 型 RE)

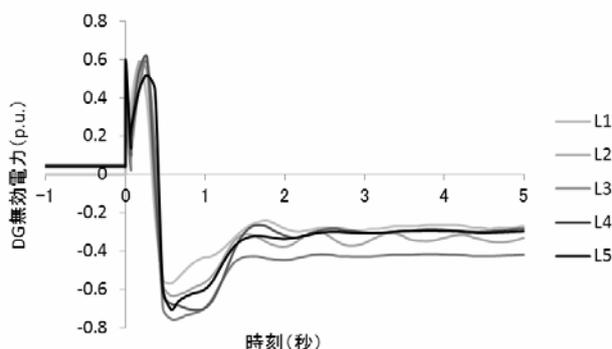


図 4.30 DVS 型 RE の系統故障時無効電力

DVS 型 RE は、瞬低直後の系統電圧が低い間は RE が無効電力を供給して電圧回復を促進し、電圧回復後には無効電力を吸収して過電圧を緩和しています。その様子を図 4.30 に示します。電圧回復までの約 0.4 秒間は無効電力を供給し、電圧回復後には無効電力を吸収しています。この無効電力を吸収する運転は過電流動作になりますから長時間継続することはできませんが、数秒以内には系統のコンデンサ開放、リアクトル投入、タップ調整などの自動制御が行われ、過電流動作は短時間で解消するでしょう。

以上のように DVS 型 RE は速い電圧崩壊防止の特効薬になっています。これは図 4.18 に示したように、DVS 型 RE の電圧 - 無効電力特性が、典型的な電圧安定化機器である SVC のそれに酷似しているから当然のことです。つまり DVS 型 RE は、その中に SVC の機能も取り込んだ装置であるともいえます。2 種類の機器の役割を 1 つで行えるので、当然、経済性に優れます。多くの RE、太陽光発電の大部分には IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, 絶縁ゲート型バイポーラ・トランジスタ) という半導体を用いたインバータで系統連系しており、この素子には DVS を可能にする能力があります。現在まではその能力を殺して使っているだけで、勿体無いというのが著者の感想です。

**【大規模な基幹系統の例】** 構造を図 4.31 に示します。比較的小規模の隣接系統と 1 点で連系していますが、この系統自身が単独の大規模基幹系統を構成しています。F1 地点において 2 回線送電線の 1 回線が 3 相地絡で停止します。故障除去時間は 0.07 秒とします。例によって負荷はモーター 50% と定インピーダンス 50% の混合とします。瞬低による一部負荷停止は当然考慮しますが、考慮しない場合も参考としてケースに含めます。負荷停止率は各負荷における瞬低深さから定めます。

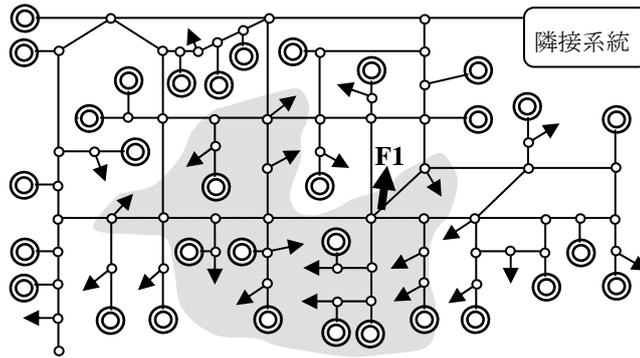


図 4.31 大規模基幹系統の構造

薄い灰色の背景を付した部分には電源が少なく，系統の電圧支持能力が弱くなっており，電圧崩壊しやすくなっています。大規模電源は灰色の部分の周辺に存在しており，大電力が灰色の部分に流入しています。F1 地点はその流入の重要なルートの一つであり，1 回線故障という比較的軽微な故障でも問題が発生するおそれがあります。

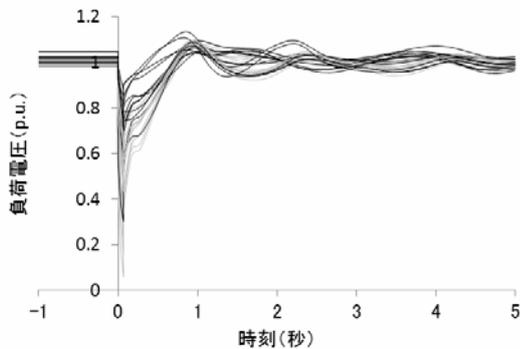


図 4.32 シミュレーション(伝統, 負荷停止なし)

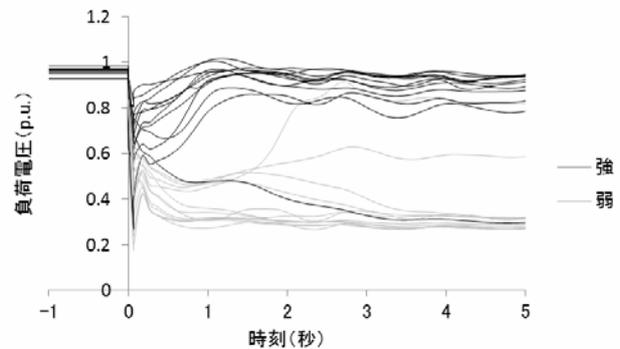


図 4.33 シミュレーション(Y結, 負荷停止なし)

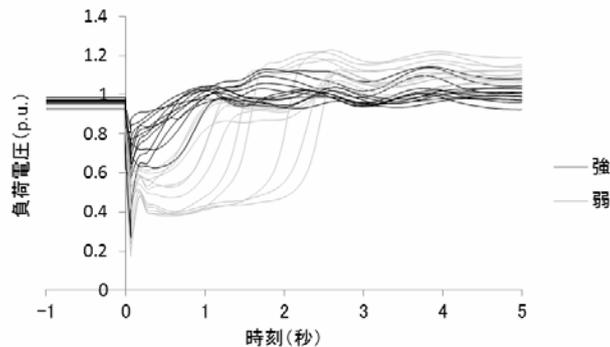


図 4.34 シミュレーション(Y結, 一部負荷停止)

シミュレーション結果を図 4.32 から 4.34 に示します。灰色の部分に含まれる電圧支持の弱い負荷は灰色の線で，それ以外の電圧支持の強い負荷は黒色の線で区別します。伝統的縮約法・負荷停止なしの場合は 1 秒以内に全部の負荷の電圧が回復します。Y 結線縮約法・負荷停止なしの場合は電圧支持の弱い負荷のほとんどが電圧崩壊に至っています。Y 結線縮約法・負荷停止ありの場合は全ての負荷が電圧回復するものの，回復には最長 2.5 秒を要しています。市販の瞬低補償装置の定格補償時間は 1 秒ですから，装置が予想せぬ長時間の瞬低に見舞われる可能性があります。回復後の過電圧はさほど大きくありません。

そこへ先に紹介した 3 種類的设计の RE を負荷の 20% 導入します。需給バランスをとるため一

部の火力を停止します。瞬低による一部負荷停止は模擬します。RE なしの場合のシミュレーション結果は既に図 4.34 に示しました。RE ありの 3 ケースのシミュレーション結果を図 4.35 から 4.37 に示します。停止型 RE の場合は電圧支持の弱い負荷全部に加え、電圧支持の強い負荷のいくつかは電圧崩壊に至っています。FRT 型 RE の場合は電圧支持の弱い負荷全部に加え、電圧支持の強い負荷 1 個が電圧崩壊に至っています。DVS 型 RE の場合は全部の負荷が 1 秒以内に電圧回復しており、RE なしの場合よりも電圧安定度が良くなっています。また瞬低後の過電圧もかなりの程度まで緩和されています。

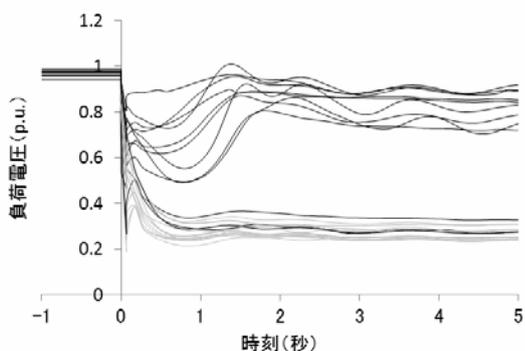


図 4.35 シミュレーション(停止型 RE)

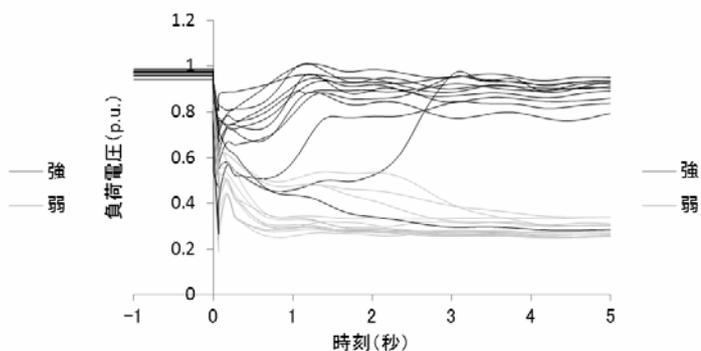


図 4.36 シミュレーション(FRT 型 RE)

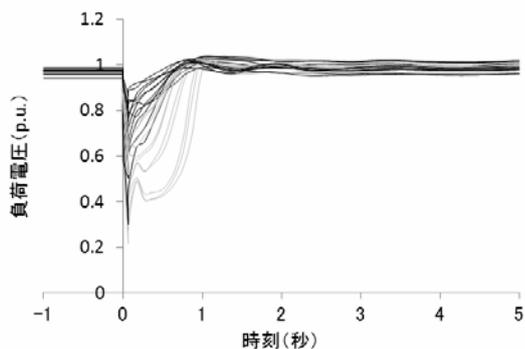


図 4.37 シミュレーション(DVS 型 RE)

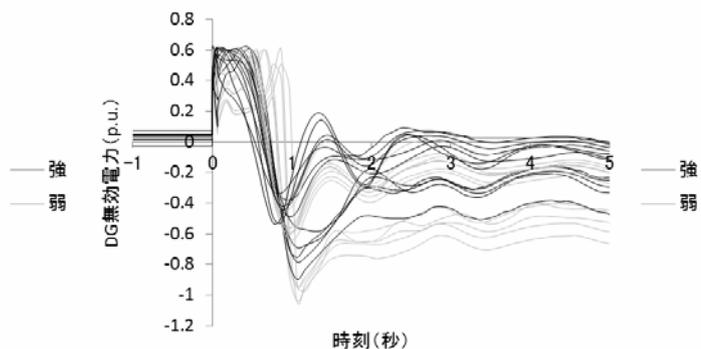


図 4.38 DVS 型 RE の系統故障時無効電力

DVS 型 RE は、図 4.48 に示すように、電圧回復までは無効電力を供給し、電圧回復後は無効電力を吸収しています。この無効電力を吸収する運転は過電流動作になりますから長時間継続することはできませんが、数秒以内には系統のコンデンサ開放、リアクトル投入、タップ調整などの自動制御が行われ、過電流動作は短時間で解消するでしょう。

この大規模基幹系統の例は先の小規模基幹系統の例と同じ傾向を示していますが、元々の電圧安定度が悪く、系統モデルの差異や RE 設計の差異による影響が更に拡大して現れているといえます。

## 電圧崩壊の蓋然性

故障を伴わない電圧崩壊は 1987 年に現実に起きており、無効電力予備力、つまりリザーブのコンデンサなどを保有していないと、また起きる蓋然性はあるでしょう。あれから 20 年以上が経過して、需要地に近い旧式火力は随分廃止されたでしょうから、電力系統は全体的に電圧安定度面で厳しい状況にあると思います。なお、故障を伴う速い電圧崩壊は次章の同期安定度の蓋然性において併せて説明します。

### P-V 曲線が過渡電圧安定度解析に不適当な理由

P-V 曲線は 1987 年の関東西部大停電事故の解析で多用され、電圧安定度解析の有力なツールと認識されております。しかし「過渡電圧安定度」が扱うモータ（誘導電動機）のストール現象は、P-V 曲線ではうまく扱えないように思われます。

**【古典:トルク-速度曲線】** 同期発電機の同期不安定（脱調）現象の解析には電力-相差角曲線が用いられます。一例を図 4.39 に示します。A 点は正常な運転状態を示す安定平衡点です。B 点は不安定平衡点で、系統動揺の最中に発電機位相が B 点を超えて進むと位相はとめどなく進み、同期が失われます。

同期発電機の電力-相差角曲線に相当するのが、モータのストールの解析におけるトルク-速度曲線です。わが国では（多分）文献(3), (4)が最初の提案だと思います。

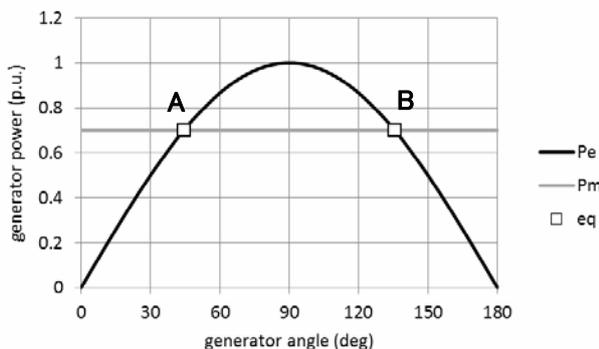


図 4.39 電力-相差角曲線(P- $\delta$ カーブ)

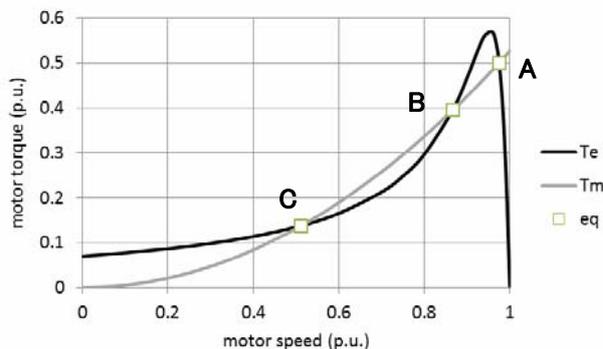


図 4.40 トルク-速度曲線(T- $\omega$ カーブ)

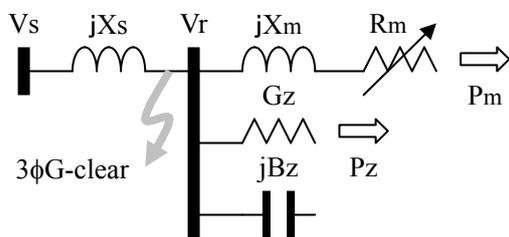


図 4.41 解析に用いたモデル

表 4.1 解析に用いた諸元

$V_s$	$X_s$	$V_r$	$X_m$	$P_m$	$R_m$	$\omega$
1.06	0.725	1.0	0.2	0.5	1.979796	0.975
$G_z$	$B_z$	$P_z$	$W_m$	$M_m$	$L_m$	
0.5	0.363216	0.5	1.0	0.5sec	0.5	

モータのトルク-速度曲線の一例を図 4.40 に、その解析モデルを図 4.41 に、諸元を表 4.1 に示します。簡単のため系統とモータ 1 次の抵抗、モータの励磁アドミタンスは無視します。いわゆる「すべりモデル」です。モータの定格容量 ( $W_m$ ) は 1.0, モータの負荷率 ( $L_m$ =消費 kW/定格 kVA) は 0.5, 単位慣性定数 ( $M_m$ ) は kVA 容量ベースで 0.5 秒です。

この諸元では、電気入力トルク  $T_e$  と機械出力トルク  $T_m$  が等しくなる平衡点は 3 個あり、両端の A と C は安定平衡点、中間の B は不安定平衡点です。B 点より僅かに減速すると、電気入力トルクは機械出力トルクを下回るの、モータは更に減速され、B 点から更に離れていきます。最終的には C 点に到達しますが、これがストールと呼ばれる状態です。系統動揺の最中にモータ速度が B 点を超えて減速すると、もう正常運転の A 点には戻れず、ストール状態の C 点に留まることとなります。系統条件によっては B, C 点が存在しないことがあり、そういう条件ではモータのストールは生じません。

故障は系統リアクタンス  $X_s$  の負荷側の故障リアクタンス  $X_f$  を介した  $3\phi G$  (3相地絡)  $-0.1$  秒クリアを模擬します。この諸元では B 点のモータ速度は  $0.8661$  です。モータは  $X_f=0$  だと速度が約  $10\%$  低下して  $0.875$  となり、B 点の少し右側に来るのでぎりぎり安定です。しかしシミュレーションでは主磁束回復の過程で無効電力を消費するため、電圧安定度が劣化し、安定限界あるいは不安定になると想定されます。 $X_f$  が  $0.1$  くらいもあれば、そこまで減速しないので、故障クリア後、多少の時間はかかっても、正常運転の A 点に回復すると想定されます。

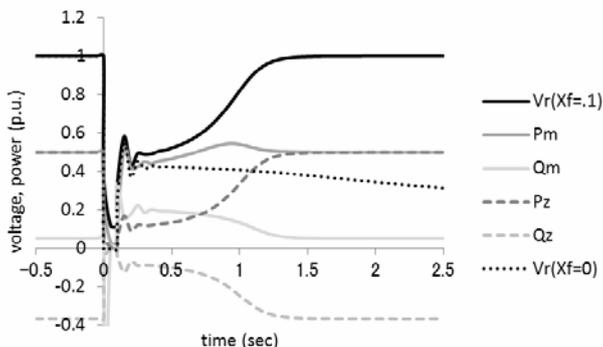


図 4.42 シミュレーション結果

想定どおりか検証するためにシミュレーションを行い、結果を図 4.42 に示します。 $X_f=0$  では故障クリア後、非常にゆっくり電圧低下が続き、安定限界より僅かに不安定です。 $X_f=0.1$  では 1 秒あまりかかって元の正常運転状態に回復します。シミュレーション結果は、トルク-速度曲線による解析とよく一致しています。

このように、モータ（誘導電動機）のトルク-速度曲線は、同期発電機の電力-相差角曲線が同期外れをよく説明できるのと同様に、モータのストールをよく説明できます。ところがわが国においては、モータのストールをトルク-速度曲線を用いて説明する文献は非常に稀で、むしろ次に紹介する P-V 曲線を用いた説明が多く見られます。

**【モダン:P-V 曲線】** モータ速度  $\omega$  を 0 近くから 1 近くまで変えながら負荷（またはモータ）消費電力と負荷電圧を P-V 平面にプロットしていけば、P-V 曲線が描かれます。この P-V 曲線はトルク-速度曲線の電気トルクに相当します。

消費電力とトルクの関係ですが、モータ 2 次入力（2 次巻線消費電力）が電気トルク、そこから 2 次巻線のジュール損を差引くと軸出力です。ここではモータの 1 次抵抗を無視していますから、モータ消費電力がすなわち 2 次入力、つまり電気トルクになります。

先に用いたトルク-速度曲線と同じ諸元で P-V 曲線を描くと、負荷消費電力については図 4.43、モータ消費電力については図 4.44 が得られます。3 個の平衡点も P-V 曲線上に存在します。2 つの図の様相は相当違います。正常運転を示す A 点が負荷消費電力 P-V 曲線では「低め解」側にあるのに対して、モータ消費電力 P-V 曲線では「高め解」側にあります。

電圧が低下すると定インピーダンス負荷の消費電力が大きく減少し、モータは消費電力をあまり減らさずに済みます。従って、モータのみに着目した P-V 曲線の方が楽観的な表示になります。シミュレーション結果でも、故障クリア直後には定インピーダンス負荷の消費電力 ( $P_z$ ) が大きく減少しているのに対し、モータ消費電力 ( $P_m$ ) は初期値とそう変わらない量が維持できております。それゆえ正常運転状態に回復できるわけです。ですから、P-V 曲線としては、モータ消費電力 P-V 曲線の方が真実を言い当てているといえるでしょう。

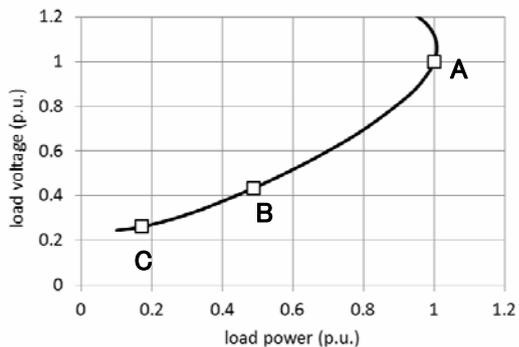


図 4.43 負荷消費電力 P-V 曲線

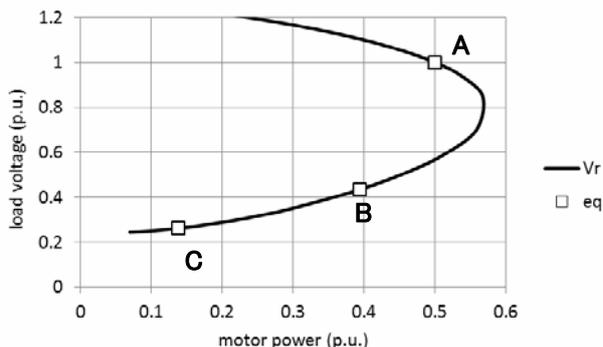


図 4.44 モータ消費電力 P-V 曲線

では P-V 曲線において安定・不安定の判別は、どのようにすればよいでしょうか。「高め解」が安定であることは論を待ちませんが、低め解が必ずしも不安定を意味するわけではありません。例えば定インピーダンス負荷では電圧不安定が絶対に発生しませんから。安定・不安定の判別のためには系統側の特性を表わす P-V 曲線の他に、トルク-速度曲線における機械トルクのように、モータを含む負荷側の特性を示す何らかのものが必要になります。

1 つの工夫として文献(5)はモータの速度 $\omega$ を固定した「等すべり曲線」を提案しています。速度を固定すればモータは定インピーダンス負荷に変身しますから、P-V 曲線上で P が V の 2 乗に比例する放物線が描かれます。3 個の平衡点を通過する「等すべり曲線」を描くと図 4.45、図 4.46 のようになります。

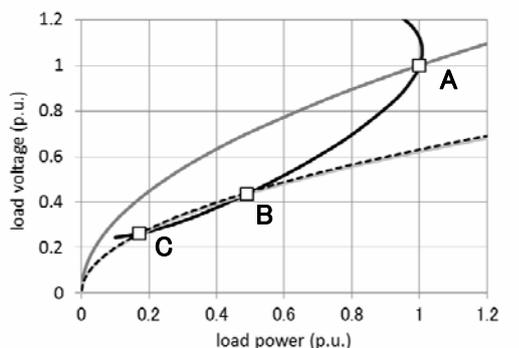


図 4.45 等すべり曲線(負荷消費電力)

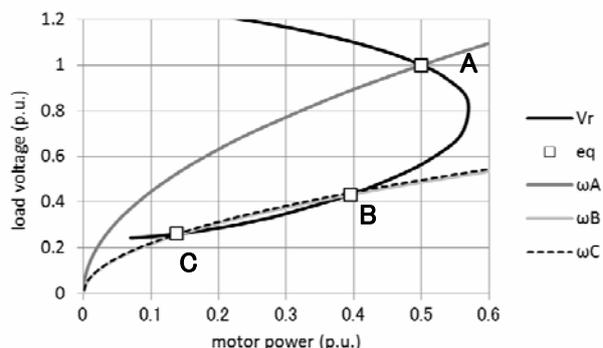


図 4.46 等すべり曲線(モータ消費電力)

2 つの図に共通して言えることは、「等すべり曲線」が P-V 曲線を左下から右上によぎる A、C 点は安定平衡点であり、左上から右下へよぎる B 点是不安定平衡点であることです。これには何か物理的な意味があるのかもしれませんが、現在のところ不明です。

この「等すべり曲線」は、文献(6)の言う「負荷特性曲線」と同一のものであり、同文献はこれを批判しております。すなわち、安定な事例では故障除去直後の P-V 曲線上の点（当然、B 点よりは右側にある）から電圧上昇の方向へ推移し、不安定な事例では P-V 曲線上の別の点（当然、B 点より左側にある）から電圧低下の方向へ推移する。その違いが P-V 曲線と「負荷特性曲線」のみからは論じることができないと批判しております。

著者はこう考えます。例えば「低め解」領域にある B 点から僅かに減速すると、電気トルク（系統パワー）は少し減少しますが、機械トルク（負荷パワー）も少し減少します。差し引き加速トルクが正になるか負になるかは、機械トルクの色度特性（例えば速度の 2 乗比例）如何によります。ところが「等すべり曲線」は機械トルクの色度特性に何も言及してありません。従って文献

(6)の批判は当たっていると考えます。

「等すべり曲線」あるいは「負荷特性曲線」に代えて、文献(6)は「安定限界線」を提案しています。これはモータの電圧をある値に設定したときに電気トルク  $T_e$  と機械トルク  $T_m$  が等しくなる回転数  $\omega$  を算出し、その電圧および回転数のときの負荷（またはモータ）消費電力を算出し、設定電圧を変化させることで、P-V 曲線に 1 つの別の曲線を得るものです。文献は「安定限界線」の右側を「安定」としていますが、これは右側が「加速」とするのが正しいと思います。

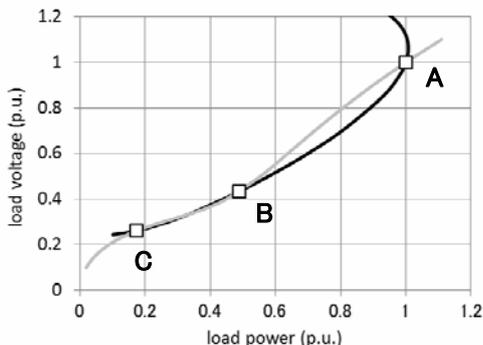


図 4.47 安定限界線(負荷消費電力)

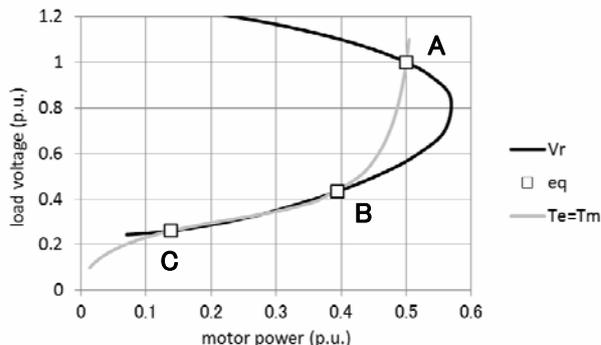


図 4.48 安定限界線(モータ消費電力)

トルク-速度曲線の諸元で「安定限界線」を計算してみると、図 4.47、図 4.48 のようになりました。点 A から点 B までの間は「加速」であることは明確ですが、点 B より左側では「安定限界線」と P-V 曲線がほとんど重なってしまい、精度よい安定・不安定判別ができそうもありません。これは「安定限界線」の概念がおかしいからです。3 個の平衡点 A, B, C においてのみ、機械的トルク  $T_m$  と電気的トルク  $T_e$  が等しくなるのであり、その他の電圧においては両トルクは一致しません。それなのに  $T_m = T_e$  と仮定すること自体が誤っています。よって「安定限界線」もまた、モータのストール現象の説明としては不適當です。

**【正解:トルク-速度曲線から P-V 曲線への変換】** P-V 曲線にはモータの機械トルクをうまく表示できないという欠点があります。それでもモータの過渡電圧不安定現象を、どうしても P-V 曲線で説明したいという人たちがおります。そこで彼らのために正解を披露しておきます。

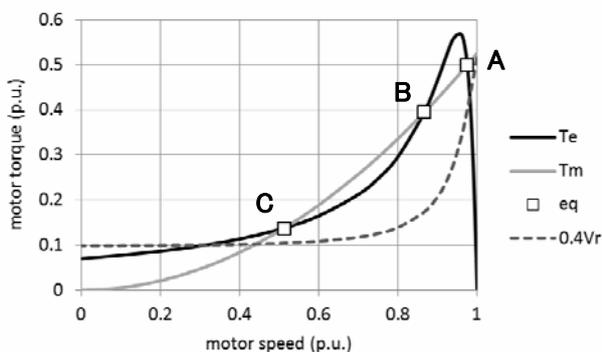


図 4.49 トルク・電圧-速度曲線

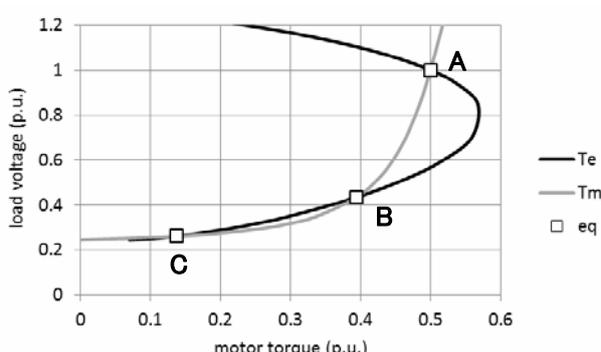


図 4.50 モータのトルク-電圧曲線

トルク-速度曲線に負荷電圧を併記すると図 4.49 のようになります。目盛の関係で電圧は 0.4 倍して表記しております。かなり非線形は強くても、速度と電圧は一对一の関係にあります。従って速度ではなく電圧を横軸にとって描くことも可能です。そして、縦軸（トルク）と横軸（電圧）を入れ替えれば図 4.50 のようになります。「安定限界線」とは異なった曲線が機械トルク曲線として得られます。電気トルク  $T_e$  が機械トルク  $T_m$  を上回ればモータは加速し、負荷電圧は上昇し

ます。従って、A 点と C 点が安定平衡点、B 点が不安定平衡点であることが読み取れます。

このモータのトルク-電圧曲線において、固定子抵抗のロスが無視すればモータのトルクはモータ消費パワーゆえ、これに定インピーダンス負荷の消費パワーを加えれば、負荷全体のパワーになり、これもまた図 4.51 のように P-V 平面に表現できます。安定平衡点 A と C、不安定平衡点 B が明瞭に見て取れます。

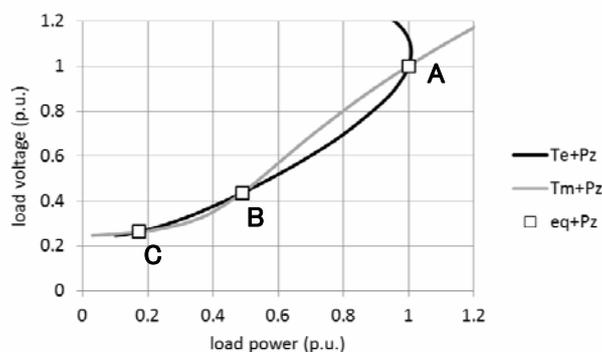


図 4.51 負荷のパワー-電圧曲線

このように、トルク-速度曲線のような明快な物理的意味は持ちませんが、無理やり P-V 曲線を用いてモータの過渡電圧不安定現象を説明することは可能です。しかし元のトルク-速度曲線で現象の説明が可能である以上、これを P-V 曲線に変換する手間をかけて説明する必然性は、趣味以外にはないでしょう。

## 文献

- (1) 駒見, 水野, 松本:「実系統に起こりうる電圧不安定現象の考察」, 平成 3 年電気学会電力技術研究会資料, PE-91-137, 1991
- (2) 浅野, 吉田, 笹林:「負荷中の誘導機に起因する電力系統の不安定」, 平成 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 8, 1993
- (3) 上田, 駒見:「分散型電源大量導入時における動的負荷の安定性解析」, 電気学会論文誌 B, 127 巻 2 号, 2007, pp. 371-378
- (4) 上田, 駒見:「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」, 電気学会論文誌 B, 128 巻 5 号, 2008, pp. 761-768
- (5) 石川, 谷口, 鈴木, 太田, 水野:「誘導機負荷の動特性を考慮した太陽光発電連系系統の電圧安定性に関する基礎的検討」, 電気学会論文誌 B, 134 巻 7 号, 2014, pp. 568-578
- (6) 河辺, 田中:「過渡電圧安定度解析のための P-V 平面における安定限界線の提案」, 電気学会電力技術研究会資料, PE-13-111, 2013, pp. 5-10