

5. 同期安定度と RE の設計

第 4 章では電圧安定度を扱いました。続く本章では次のテーマ、同期安定度を扱います。これは系統故障のショックで一部の同期発電機が「同期外れ」を起こす現象です。教科書に記載されているような古典的な同期安定度解析では 1 発電機対無限大母線系統モデルを用いています。発電機近傍の負荷は考慮されません。このモデルは遠方の大規模電源が長距離送電線を介して大規模需要を擁するパワープールに送電する場合には、かなりの現実味があります。しかし大規模連系系統の中の一部の系統の同期安定度を扱う場合には、近傍の負荷の動的特性を考慮する⁽¹⁾ことが不可欠であり、教科書のような 1 発電機対無限大母線系統モデルでは扱うことができません。理論の拡張が必要になります。

同期安定度が破れるメカニズム

負荷の動的特性の大部分は負荷中に含まれるモーター（誘導電動機，Induction Motor，IM）によりもたらされます。負荷中には相当量のモーターが含まれていると思われるので、電力系統に多量に存在する同期発電機と誘導電動機という 2 種類の回転機が、系統電圧低下を共通項にして、図 5.1 に示すメカニズムにより互いに不安定化しあうものと考えする必要があります。

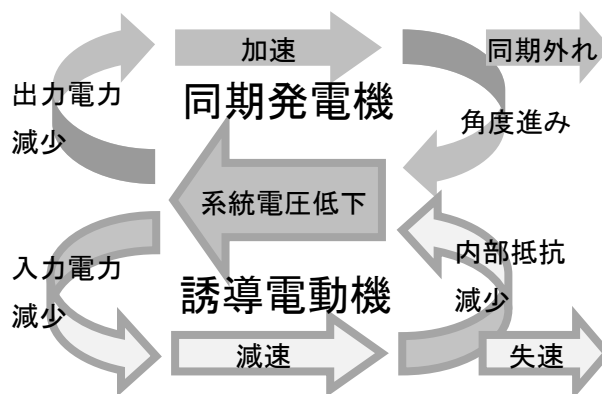


図 5.1 安定度が破れるメカニズム

同期発電機の不安定現象は同期外れであり、これを扱うのは同期安定度解析です。誘導電動機の不安定現象は失速（ストール）で、これを扱うのは（速い）電圧安定度解析です。しかし図のメカニズムに従えば、両者はもはや単独では扱えず、統合した「速い不安定現象」として扱われねばなりません。

この統合した速い不安定現象を扱うには、少なくとも図 5.2 に示す要素を網羅した系統モデルが必要になります。この構造は系統縮約を扱った第 3 章で既に紹介しています。基幹母線にはコンデンサ C_B が置かれていますが、地中ケーブルの充電容量もコンデンサと同じ作用をします。66kV 級の間接母線にも大量のコンデンサ C_M があります。負荷は固定インピーダンス Z_L 背後の可変抵抗 R_L として表現しています。観測データによれば深い瞬時電圧低下（瞬低）では R_L は正常時の 60%程度にまで低下しており、シミュレーション結果によればモーターがストールするときには R_L は正常の 40%程度にまで低下しています。

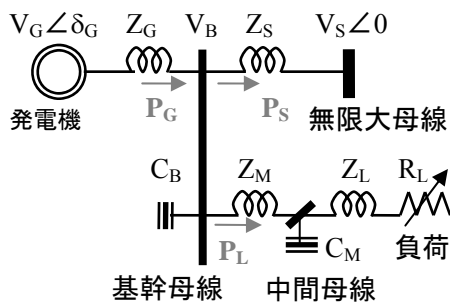


図 5.2 「速い不安定現象」を扱うための最小モデル

この系統モデルは古典的な 1 発電機対無限大母線に比べてはるかに複雑ではありますが，解析は可能です。内部抵抗 R_L が変化する動的負荷は， R_L をパラメータにして複数の電力-相边角曲線 (P- δ カーブ) を描けば状況が把握できるでしょう。

負荷ブランチのインピーダンス Z_M と Z_L は，系統電圧が低下すると負荷抵抗 R_L の電力消費を妨げます。負荷の電力消費が減れば発電過剰となり，余分のパワーは発電機を加速します。他方，負荷は電力消費を妨げられるのでモーターが減速します。こうして発電機もモーターもともに不安定状態に陥っていきます。このような現象は負荷ブランチのインピーダンスを無視した伝統的縮約法では現れにくくなり，結果的に伝統的縮約法は系統安定度を不当に楽観的に評価してしまいます。

瞬低に伴う一部負荷停止は，負荷消費電力が減少して発電機加速を促進し安定度を悪化させるという側面と，系統電圧の回復により負荷消費電力を早期に回復して不安定を緩和するという側面の，両面を持ちます。どちらの側面が強いかは，詳細なシミュレーションを行ってみなければ分かりません。

本章の主要テーマは再生可能エネルギー (Renewable Energy, RE) が大量に系統連系されたとき，同期安定度にどのような影響があるかです。RE は (特に太陽光は) 負荷近傍に立地しますから，モーターなどの負荷の動的特性，負荷ブランチなどの負荷系統の正確な縮約表現が不可欠と考えます。

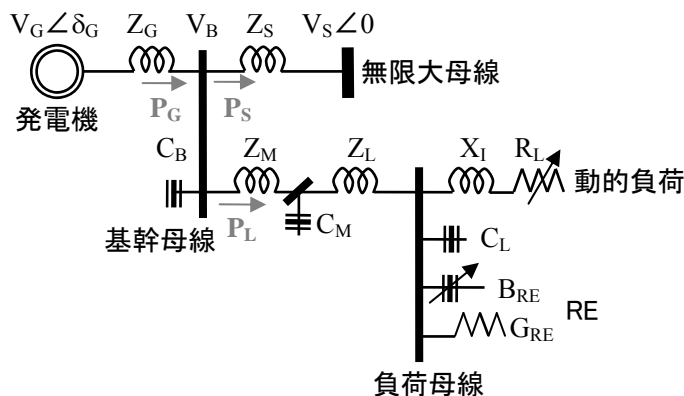


図 5.3 RE を考慮した「速い不安定現象」の最小モデル

RE 大量普及時の最小モデルは図 5.3 のようになります。RE は負荷端子にマイナスの定コンダクタンス G_{RE} と可変サセプタンス (コンデンサのこと) B_{RE} として模擬してみました。勿論，定電流源，定電力源，定電圧源としても模擬可能ですが，系統電圧低下時に RE 出力が減少するこ

とは系統安定にとって好ましいことなので、その効果が最も高いマイナスの定抵抗としました。RE は負荷の 20% 普及し、需給バランスのため一部の火力が停止するものとします。RE の設計は次の 3 種類を想定します。

「停止型」RE は瞬低で停止する。

「FRT 型」RE は瞬低で停止しないが、瞬低後の系統電圧回復を支援しない。

「DVS 型」RE は瞬低で停止せず、瞬低後の系統電圧回復を支援する。

DVS 型 RE の電力-電圧特性は次式を仮定します。 Y_{RE0} は定格出力時のアドミタンスです。

$$\begin{aligned} P_{RE} &= G_{RE0} \left(\frac{V_{RE}}{V_{RE0}} \right)^2 \\ Q_{RE} &= Y_{RE0} \left[\left(\frac{V_{RE}}{V_{RE0}} \right)^2 - \left(\frac{V_{RE}}{V_{RE0}} \right)^{12} \right] = B_{RE} \left(\frac{V_{RE}}{V_{RE0}} \right)^2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

従来の同期外れと速い電圧崩壊を統合した「速い不安定現象」という観点で構築した系統モデルを用いて安定度計算を行うと、従来は安定と評価されていたものが続々と不安定になってきます。従って現在も幾多の問題を抱えたまま運用しているのですが、それら問題をここで記載するには及ばないでしょう。

発電機に慣性は不可欠か？

再生可能エネルギー（Renewable Energy, RE）の多くはインバータで連系するため同期発電機のような大きい慣性を有しておりません。そのことを理由に正式な電源として認知できないという意見をよく聞きます。この意見は、実は、未だ検証・反証されてはおりません。検証・反証可能なのにしないのは疑似科学の態度といえます。そこで著者が代表して反証を行い、誤解を解いておきたいと思います。

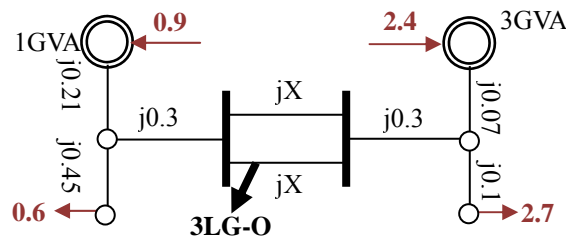


図 5.4 例題系統の構造と定数

検証のための最小モデルとして 2 個の部分系統が 2 回線送電線で連系した図 5.4 に示すモデル系統を用います。2 個の部分系統には Y 結線縮約法⁽¹⁾を適用しており、従って負荷に至る流通経路のインピーダンスを考慮しています。但し簡単のためインピーダンスの抵抗分は省略し、純リアクタンスで近似しています。負荷は実態を踏まえ、モーター 50% と抵抗 50% の混合とします。左の小系統 1 が右の大系統 2 に送電しているものとします。連系 2 回線送電線の小系統端で 1 回線 3LG-O 故障を想定します。故障持続時間は 0.1 秒とします。

系統電源は同期発電機とし、定数は表 5.1 に示します。慣性は 7.0 秒とします。调速機系を図 5.5 に、励磁系を図 5.6 に示します。電中研 Y 法によるシミュレーションを用い、連系送電線のリアクタンス X（1 回線あたり）を大きくしていき不安定現象を発現させてみます。

表 5.1 系統電源の定数

X_d	X_d'	X_d''	T_d'	T_d''	X_q	X_q'	X_q''	T_q'	T_q''	T_a
1.7	0.3	0.25	1.0	0.03	1.7	0.6	0.25	0.3	0.03	0.19

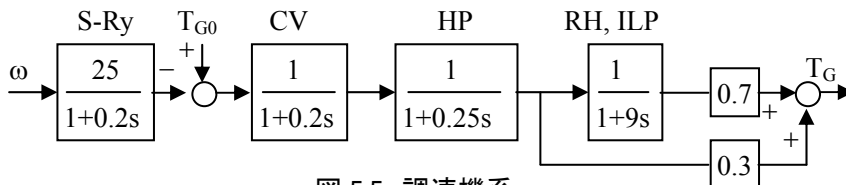


図 5.5 調速機系

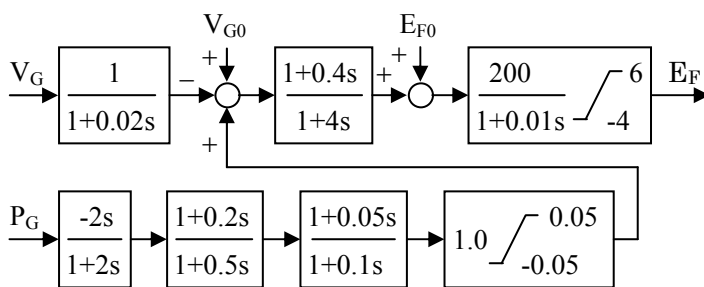


図 5.6 励磁系

【同期発電機】 X を 0.7 まで増加すると図 5.7 に示すように不安定となりました。故障中の電圧低下により小系統 1 の発電機出力 (PG1) は大きく低下しますが、原動機トルク (TG1) は大きく変化しません。結果的に過剰となったエネルギーは慣性に蓄積され、発電機位相 (AG1) が進みます。この例題では動揺 1 波目は持ちこたえるものの、2 波目で加速脱調し、不安定となりました。

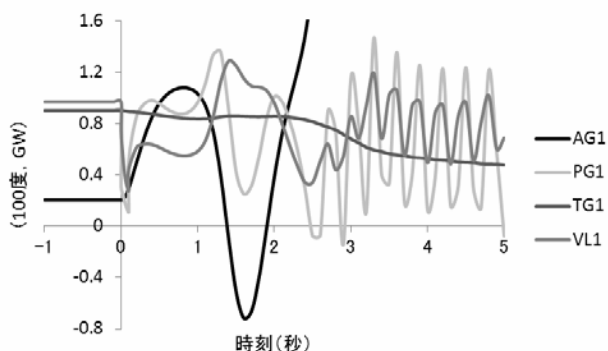


図 5.7 同期発電機の安定限界

【超軽量同期機】 ここで系統電源の慣性を極小にしてみます。慣性を除く発電機定数，励磁装置，送電線リアクタンス X は標準慣性ケースと同じとします。調速機系は図 5.8 のように変更します。これは次の理由によります。すなわち，大きな系統擾乱があると発電機は原動機からのパワーをそのまま系統に送り出せなくなります。そこで短時間だけ原動機トルク (TG) を発電機出力 (PG) に追随させます。従って原動機のパワーの一部は棄てられます。現に，太陽光発電 (PV) は交流出力が減少すると直流電圧が上昇し，太陽光パネルの直流出力が減少しますから，この仮定は十分現実味があります。

安定限界の慣性は 0.02 秒という極端に小さい値でした (図 5.9)。故障による電圧低下 (瞬低) 中, 原動機トルク (TG1) は発電機出力 (PG1) にうまく追随し, 原動機は過剰なパワーを棄てて発電機には供給しません。このため慣性が極端に小さくても発電機の位相の進みは小さく抑えられます。慣性が極小なので故障クリア後の電力動揺もほとんど生じません。

調速機系に制御遅れが 0.01 秒ありますから, その遅れをカバーする程度の慣性 (に相当する何か) は必要です。PV では直流コンデンサがこれに相当します。慣性 0.02 秒は安定限界ゆえ原動機トルク (TG1) の追従にやや不十分な面が見られますが, 慣性が 0.1 秒もあれば追従は十分円滑になります。

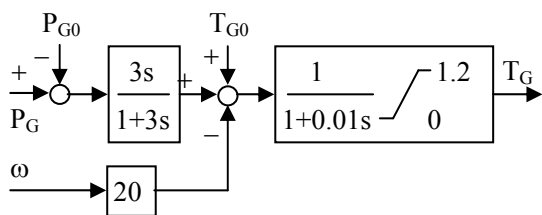


図 5.8 軽量発電機用調速機系

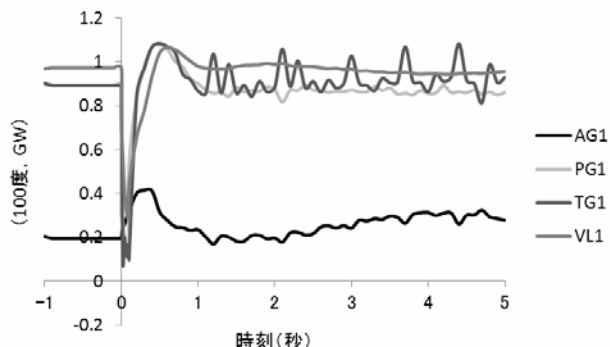


図 5.9 超軽量同期機の安定限界

【インバータ電源+同期調相機】 同期発電機に替えてインバータ電源とします。インバータ出力は電圧により次のように制御されるものとします。ここに W はインバータ定格容量です。有効電力制御は普通の同期発電機の半分程度の感度の速い調速機機能を持つようにします。無効電力制御は SVC に似た特性, 所謂 DVS (Dynamic Voltage Support) 機能を持たせます。ともにインバータ電源には容易に実現可能な機能です。数式で表わすと次のようになります。

$$\begin{aligned} \text{有効電力 } P &\propto V^2 f^{-10} \\ \text{無効電力 } Q &= W (V^2 - V^{12}) \end{aligned}$$

しかし DVS 機能だけでは系統電圧支持能力がやや不足します。そこでインバータと並列にインバータの 30% の容量の同期調相機 (RC, Rotary Condenser) を設け, 穏やかな AVR (Automatic Voltage Regulator, 自動電圧制御) を持たせます。その他は前章までの条件と同じです。

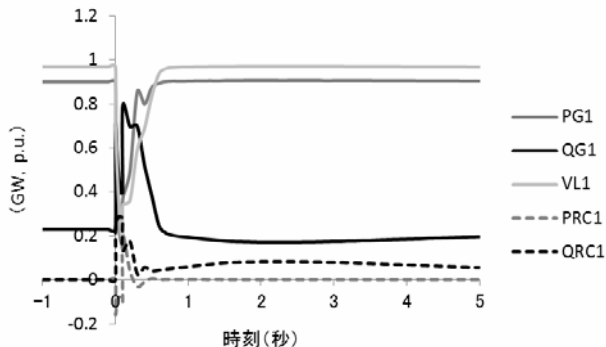


図 5.10 インバータ電源の安定限界

RC の慣性を小さくしていくと不安定になります。本ケースでは 0.5 秒が安定限界でした (図 5.10)。過渡的変動は故障発生から 0.5 秒で収まっており, 慣性極小の同期発電機のケースよりも

更に安定度は良くなっています。故障点に近い小さい方の系統 1 の RC は故障クリア後に若干無効電力を増加させていますが、これは連系線の無効電力ロスの増を補填するためです。

このように、系統故障により原動機出力（つまり発電機入力）と発電機出力には、それらの物理から何がしかの不均衡が生じ、その不均衡を吸収するのが慣性（に相当するもの）の役割です。必要となる慣性の大きさは原動機・発電機系の物理によって異なります。タービン・同期発電機という通常の系ではこの不均衡が非常に大きいので非常に大きな慣性を必要とします。PV パネル・インバータという新顔の系ではこの不均衡が極小なので極小の慣性（に相当するもの）しか必要としません。発電機に何がしかの慣性（に相当するもの）が必要なことは真実ですが、その必要性は系によっては 2 桁以上の違いがあります。ゆえに、PV が小さな慣性（に相当するもの）しか持たないから本格的な電源たりえないと断じることは不当です。

むしろ PV などの RE の系統連系上の問題は系統電圧支持能力の低さです。同期発電機は強力な定電圧源ですが、RE のインバータは定電流源となるよう制御されます。これは故障に伴う系統電圧低下時に過電流が生じないよう配慮しているからです。定電流源の系統電圧維持能力は定電圧源より劣ります。従って同期発電機が RE に置き換えられると系統全体の電圧支持能力が減退して電圧安定度が劣化し、そのあおりで同期安定度も劣化します。その緩和策として RE に DVS (Dynamic Voltage Support) 機能を備えることが効果的になってきます。

以上述べてきた理論を検証するため、基幹系統の中から、外部へ電力を送っている送電系統を 1 例、外部から電気を受けている受電系統を 1 例の解析結果を紹介することとします。

送電系統の例

この送電系統の構造を図 5.11 に示します。大規模連系系統の末端に位置し、外部系統へ多少の電力を送電しています。同期外れは、普通、発電機の位相が進みすぎて生じるものです。これを「加速脱調」と言います。当然その双対概念として「減速脱調」というものもありえます。送電系統の発電機は、故障前の状態から既に外部系統の発電機より位相が進んでいるので同期外れしやすい、というのが従来の常識です。

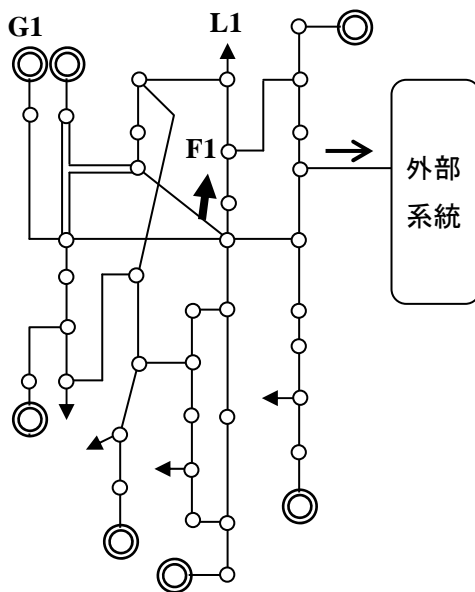


図 5.11 送電系統の構造

故障はF1地点で2回線送電線の1回線が3相地絡で停止するものと想定します。故障除去時間は0.07秒とします。この送電系統を伝統的縮約法とY結線縮約法で1発電機と1負荷に縮約したときの諸元を表5.2に示します。

表 5.2 系統状態 (故障クリア後, 発電機容量ベース)

	Z_g		Z_s		Z_m		Z_L		
伝統法	0.00603+j0.50124		0.08982+j3.23466		0.00698+j0.21163		0.00000+j0.00000		
Y結線法	0.00625+j0.50575		0.08959+j3.23015		0.00404+j0.35907		0.00992+j0.27011		
	V_g	δ_g	V_b	V_s	P_g	P_L	P_s	C_b	C_m
伝統法	1.15	0.52607	1.02	1.02	0.76007	0.68992	0.06290	0.00000	0.05000
Y結線法	1.15	0.52885	1.02	1.02	0.76007	0.68648	0.06291	0.00000	0.27000

電力-相差角曲線 (P- δ カーブ) は R_L を正常時の 100% から 80%, 60%, 40% と変えて描きます。これはモーターの減速を意識したものです。結果は図 5.12 のようになりました。簡単のため瞬低に伴う一部負荷停止は無視しています。

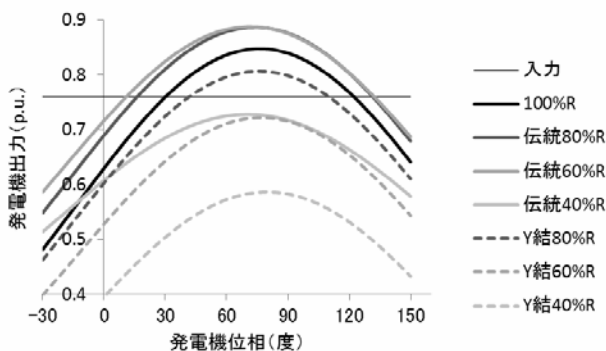


図 5.12 負荷内部抵抗の減少と P- δ 曲線 (送電)

伝統的縮約法に比べて Y 結線縮約法では瞬低による負荷内部抵抗の低下に伴う発電機出力の低下が著しく、余剰になったエネルギーが発電機を加速させ同期外れに至るといったシナリオが現実的になってきます。

シミュレーション結果は、発電機は位相を図 5.13 に、負荷は内部抵抗を図 5.14 に示します。

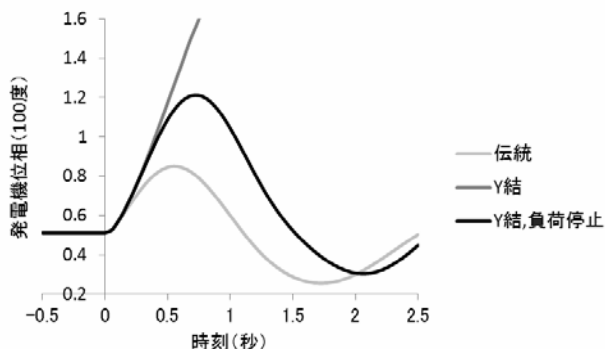


図 5.13 発電機のシミュレーション (送電)

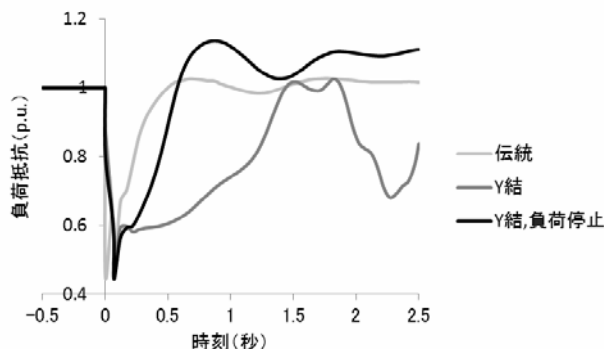


図 5.14 負荷のシミュレーション (送電)

負荷内部抵抗は対象系統に含まれる全負荷が消費する有効電力 P_{sum} , 無効電力 Q_{sum} , および

負荷電圧加重平均 V_{ave} から次式で計算します。

$$R_L = \frac{V_{ave}^2 P_{sum}}{P_{sum}^2 + Q_{sum}^2}$$

伝統的縮約法では一部負荷停止を無視しても発電機は悠々安定を保ち、負荷内部抵抗も 0.3 秒で正常に回復しており、速い不安定現象が現れる余地はありません。これに対し Y 結線縮約法では、一部負荷停止を無視すると負荷内部抵抗の回復に 1.5 秒を要し、その間に発電機は加速脱調してしまいます。一部負荷停止を考慮すると負荷内部抵抗は 0.6 秒で回復し、発電機の加速脱調は免れています。但し一部負荷停止の影響で若干の過電圧を生じています。故障除去直後の負荷抵抗は、どのケースでも正常の 60%程度になっています。そのときの電力 - 相差角曲線は、伝統法では発電機出力が入力を上回る位相の領域がありますが、Y 結線法では出力が入力を常に下回っています。

そこへ負荷の 20%の RE が普及したときの影響を評価します。シミュレーション結果は発電機位相を図 5.15 に、負荷抵抗を図 5.16 に示します。一部負荷停止は考慮しています。停止型 RE の場合は、発電機は加速脱調、負荷はストールに至っており、著しく不安定になっています。RE 停止の影響は、発電減少による発電機位相進み防止効果よりも、負荷向け下り潮流増による負荷回復遅れの弊害の方が支配的なようです。FRT 型 RE の場合は負荷抵抗回復が少し遅くなります。DVS 型 RE の場合は発電機位相進みが非常に小さく抑えられており、負荷抵抗の回復も速く、格段にすぐれていると評価できます。

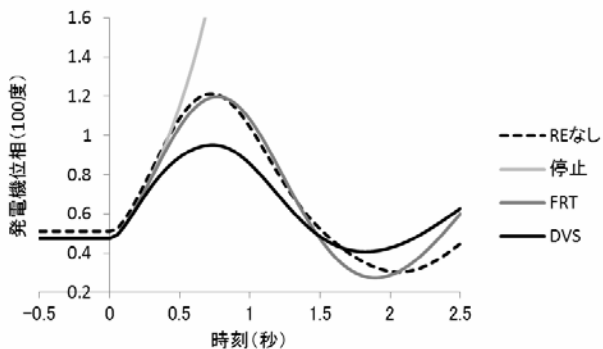


図 5.15 RE 設計の発電機への影響(送電)

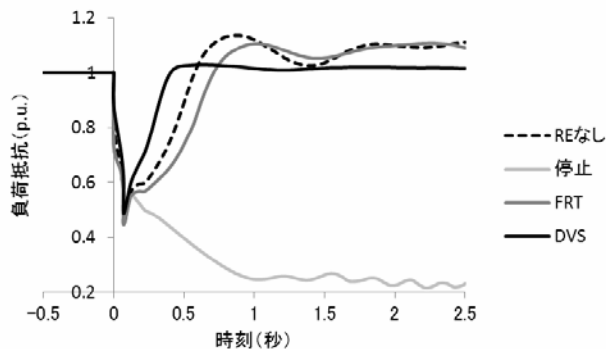


図 5.16 RE 設計の負荷への影響(送電)

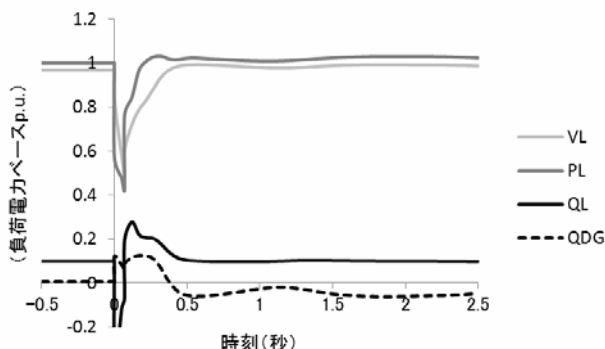


図 5.17 DVS 型 RE の系統故障時無効電力(送電)

DVS 型 RE の効果的な働きの様子を図 5.17 に紹介します。負荷は原状回復のために故障クリア

直後の 0.3 秒間ほど大きな無効電力を消費しますが、これを DVS 型 RE がほぼ全量供給しています。これは RE が負荷近傍に立地しているためです。また負荷が回復した後は系統の無効電力ロスが減少した分を吸収し、過電圧を緩和しています。

以上のように送電系統の場合では、モーター負荷は電圧を不安定化するように働き、その結果、同期安定度は従来思っていた以上に厳しいことが分かります。そのリスクは 50% 程度のモーター負荷と Y 結線縮約法を採用しなければ分かりません。RE は設計次第で同期安定度を改善 (DVS 型) もするし、悪化 (停止型) もさせます。

受電系統の例

この受電系統の構造を図 5.18 に示します。大規模連系系統の中央に位置し、3 ルートの送電線で外部系統から多量の電力を受電しています。受電系統の発電機は、故障前の状態において外部系統の発電機より位相が遅れているので同期外れしにくい、というのが従来の常識です。

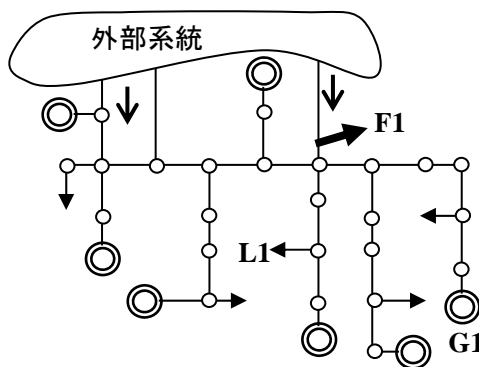


図 5.18 受電系統の構造

故障は F1 地点で 2 回線送電線の 2 回線とも 3 相地絡で停止するものと想定します。残りの 2 ルートで受電電力を運ぶので厳しい状態になりますが、従来の常識では同期外れに至ることはありません。故障除去時間は 0.07 秒とします。故障後の系統を伝統的縮約法と Y 結線縮約法で 1 発電機と 1 負荷に縮約したときの諸元を表 5.3 に示します。

表 5.3 系統状態(故障クリア後, 発電機容量ベース)

	Z_g		Z_s			Z_m		Z_L	
伝統法	0.01529+j0.58088		0.02829+j1.31708			0.00067+j0.02183		0.00000+j0.00000	
Y 結線法	0.01531+j0.58121		0.02827+j1.31674			0.00144+j0.11252		0.00182+j0.12039	
	V_g	δ_g	V_b	V_s	P_g	P_L	P_s	C_b	C_m
伝統法	1.10	-0.20638	1.00	1.00	0.82745	1.27476	-0.46452	0.36000	0.00000
Y 結線法	1.10	-0.20583	1.00	1.00	0.82745	1.27062	-0.46447	0.28000	0.46000

電力-相边角曲線 (P- δ カーブ) は R_L を正常時の 100% から 80%, 60%, 40% と変えて描きます。これはモーターの減速を意識したものです。結果は図 5.19 のようになりました。簡単のため瞬低に伴う一部負荷停止は無視しています。伝統的縮約法に比べて Y 結線縮約法では瞬低による負荷内部抵抗の低下に伴う発電機出力の低下が著しく、余剰になったエネルギーが発電機を加速

させ同期外れに至るというシナリオが現実的になってきます。

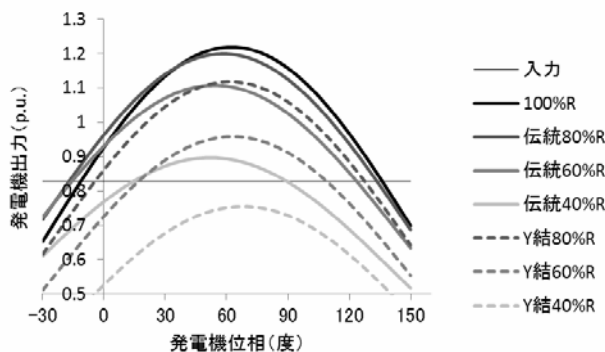


図 5.19 負荷内部抵抗の減少と P- δ 曲線(受電)

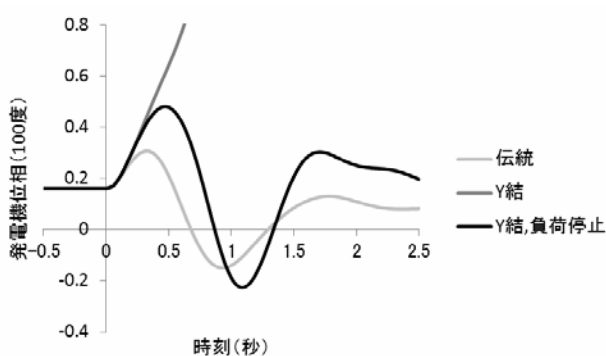


図 5.20 発電機のシミュレーション(受電)

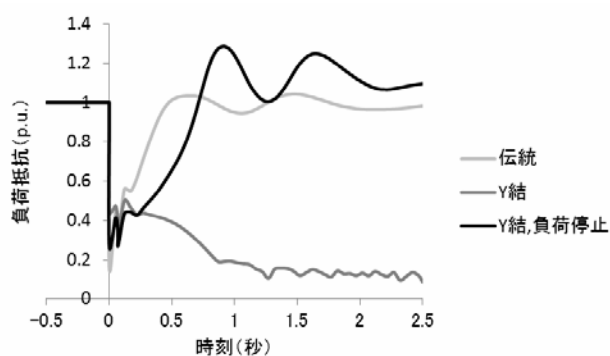


図 5.21 負荷のシミュレーション(受電)

シミュレーション結果は、発電機は位相を図 5.20 に、負荷は内部抵抗を図 5.21 に示します。伝統的縮約法では一部負荷停止を無視しても発電機は悠々安定を保ち、負荷内部抵抗も 0.4 秒で正常に回復しており、速い電圧崩壊が現れる余地はありません。これに対し Y 結線縮約法では、一部負荷停止を無視すると負荷内部抵抗は回復せず、発電機は加速脱調してしまいます。一部負荷停止を考慮すると負荷内部抵抗は 0.8 秒で回復し、発電機の加速脱調は免れています。但し一部負荷停止の影響でかなりの過電圧を生じています。故障除去直後の負荷抵抗は、どのケースでも正常の 40%程度になっています。そのときの電力 - 相差角曲線は、伝統法では発電機出力が入力を上回る位相の領域がありますが、Y 結線法では出力が入力を常に下回っています。

そこへ負荷の 20%の RE が普及したときの影響を評価します。シミュレーション結果は発電機位相を図 5.22 に、負荷抵抗を図 5.23 に示します。一部負荷停止は考慮しています。

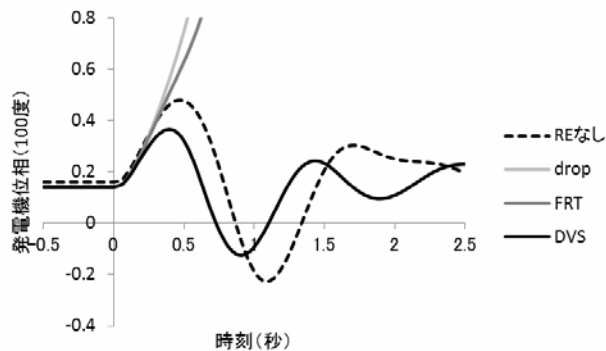


図 5.22 RE 設計の発電機への影響(受電)

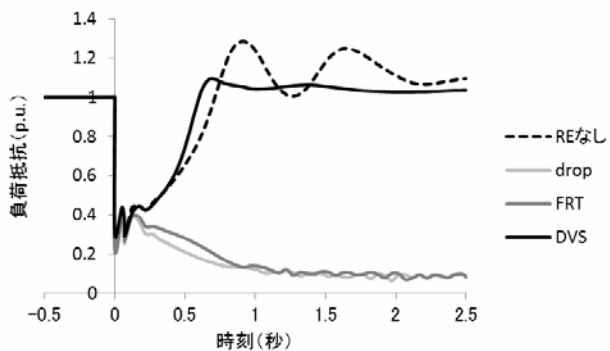


図 5.23 RE 設計の負荷への影響(受電)

停止型 RE の場合、発電機は加速脱調、負荷はストールに至っており、著しく不安定になっています。FRT 型 RE の場合も発電機は加速脱調、負荷はストールに至っており、著しく不安定で、停止型と大きな差がありません。DVS 型 RE の場合は、発電機位相進みは小さく抑えられており、負荷抵抗の回復も少し速く、優れていると評価できます。

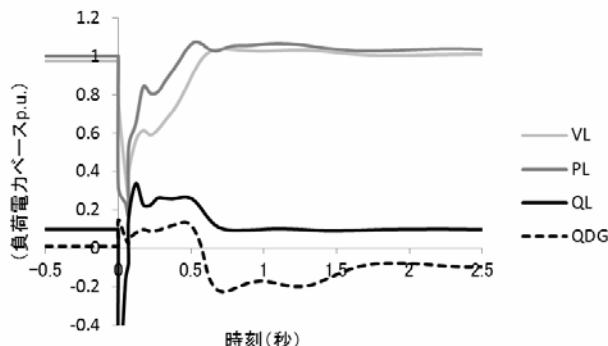


図 5.24 DVS 型 DG の系統故障時無効電力(受電)

DVS 型 RE の効果的な働きの様子を図 5.24 に紹介します。原状回復のため、負荷は故障クリア直後の 0.6 秒間ほど無効電力を消費します。これを DVS 型 RE がほぼ全量供給しています。これは RE が負荷近傍に立地しているためです。また、負荷が回復した後は系統の無効電力ロスが減少した分を吸収し、過電圧を緩和しています。

以上のように従来の常識とは異なり、受電系統の場合でもモーター負荷のストールが引き金になって同期外れが起こればなりません。そのリスクは 50% 程度のモーター負荷と Y 結線縮約法を採用しなければ分かりません。RE は設計次第で同期安定度を改善 (DVS 型) もするし、悪化 (停止型) もさせます。

同期安定度が破れる蓋然性

著者の 30 年以上の電気技術者人生で同期安定度が敗れた事例はただ 1 件しか見ていません。これは 77kV 母線故障で、保護装置が粗末な時代ゆえ故障除去に 1 秒もかかり、その間に 154kV 系の火力が同期外れに至ったものです。但し計算上は故障がずっと続いても同期外れしないはずで、なぜ同期外れに至ったのでしょうか。犯人は OEL (Over Excitation Limiter, 過励磁制限) の整定にありました。同期発電機の界磁巻線は巨大な鉄の塊でできている回転子に巻かれているので、過電流になってもそう易々とは温度上昇しません。普通は数十秒の時限を持たせてあります。ところがこの発電機は時限がゼロになっていたのです。77kV 母線故障と同時に界磁電流は増大し、OEL が動作し、界磁電流を絞った結果、磁束が弱まり、同期安定度が維持できなくなったのです。これ以降、火力発電機の OEL の整定も系統部門のチェックを受けるべし、というルールになりました。

モーター負荷と不安定を促進しあうという悪夢は 3 相故障でモーターが大きく減速する場合に発生しやすい。では送電線に雷撃があったときに 3 相故障になるだろうか？ 雷は (普通は) マイナスの電荷が落ちてくるので、送電線はプラスの電位にある相が放電しやすくなります。しかし 3 相のうち少なくとも 1 相はマイナスの電位になっておりますから、3 相全部が故障させるのは相当大きな雷です。こういうわけで雷撃による 3 相故障は多くはなく、高電圧の基幹系統では非常に少なくなっています。それに送電線では故障点は変電所母線からかなりの距離があり、母

線から見ればその距離によるインピーダンスを介した 3 相故障ですから、母線での完全短絡よりは程度が軽く、易々と同期外れに至るとは思えません。

もしこの種の同期外れが発生するとすれば、母線故障でしょう。2 通りのシナリオが考えられます。第 1 は 3 相一括母線型 GIS (Gas Insulated Switchgear) の内部故障で、最初は 1 相地絡でも半サイクル (8 ミリ秒) もたないうちに 3 相故障になります。第 2 は作業安全のために付けた現場接地を外し忘れて充電するというヒューマンエラーです。これらはかなり現実味があり、ヒューマンエラーは訓練などで減らせるでしょうが、GIS は経年劣化が進むと故障の蓋然性が高まり、診断技術の水準が低いと、本当に同期外れ現象を引き起こしかねないと著者は見ております。

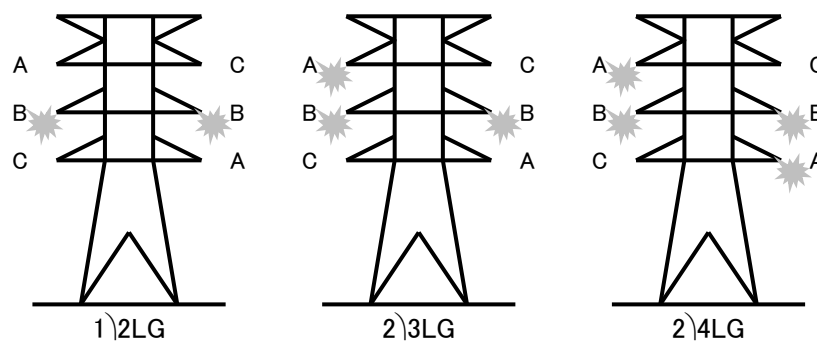


図 5.25 超高压送電線の典型的な 2 回線故障

送電線故障で同期外れが起こるとすれば、高速多相再閉路図を行う超高压送電線における図 5.25 のような 2 回線にまたがる故障であり、中でも 2 相が故障し 1 相が欠けた状態になる 2 ϕ 3LG が厳しい。2 ϕ 4LG の場合は 2 回線とも停止するので、ループ系統でなければ同期安定度の範疇外です。

なお特に 1 ϕ 2LG の場合は高速再閉路するまでの 1 秒ほどの間 (無電圧時間といいます)、A 相・C 相から静電誘導・電磁誘導により B 相にエネルギーが多く供給されるので、故障のアークが消えにくくなり、アークが消えないうちに再閉路すると再び故障してしまい、再度の高速再閉路は遮断器の性能上無理で、再閉路失敗相を含む 3 相一組全部が停止します。それゆえ送電線互長と無電圧時間の間には条件があり、著者が計算してみたところでは、0.833 秒 (60Hz 系統の 50 サイクル) の無電圧時間では互長 100km 以内の 500kV 送電線ならまず安全です。

文献

- (1) 石丸, 駒見:「誘導機負荷が過渡安定度に与える影響」, 平成 10 年電気学会全国大会, No. 1286, 1998.
- (2) 上田, 駒見:「動的負荷の影響を考慮した減速脱調現象」, 平成 17 年電気学会電力系統技術研究会資料, PSE-05-12, 2005
- (3) 上田, 駒見:「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」, 電気学会論文誌 B, 126 巻 10 号, 2006, pp. 969-976