

2. 負荷モデル

現実的な電力システムモデルの重要性⁽¹⁾

手計算であれシミュレーションであれ、解析結果の信頼性はツールの信頼性とモデルの信頼性の掛算である。一方がゼロなら全体がゼロになる。ツールは多くの人が多くの目的に共用するので、不都合は早期に修正され、信頼性はよく検証されている。しかしモデルは目的や研究者により異なるので、信頼性がよく検証されていないのが普通である。従ってシミュレーションの信頼性を損ねるのは主としてモデルの方である。

再エネ系統影響を扱う場合、再エネモデルと電力システムモデルを用いる。再エネモデルは実物で試験ができるから精密なものが作成できる。これに反して電力システムでは、需要家に被害を及ぼさないために実システムで人工的に故障を起こすことはしないから、その妥当性の検証は難しい。従って再エネ系統影響の解析の妥当性を損なうのは電力システムモデルの側である。電力システムモデルの信頼性を検証するには、設備を忠実に模擬することに加え、現実生じた悪しき物理現象を計算で再現できることが必須である。

1970年代のシミュレーション・ツールの登場により電力システム解析は大きく効率化され、一応の完成を見るに至り、電気学会誌 1980年1月号で小特集が組まれている。その中の「電力システムの安定度解析⁽²⁾」では今後行うべき研究として次の4項目があげられている。

- (i) 高精度な諸元収集と能率的なデータ管理システム
- (ii) 発電機や制御系の簡易な定数測定方法
- (iii) 負荷実態調査と負荷のモデル化
- (iv) 高精度な系統縮約方法

つまり、データの精度という要求は当然のこととして、理論面での進展が求められるのは負荷モデルと系統縮約の2つであると述べられている。しかし2017年に至るまで、わが国においてはこの2つの領域において広範囲に普及した技術的進歩がない。そこで再エネ系統影響の各論に入る前に2つの章を置き、紹介されているが、わが国ではいまだ普及していない負荷モデルと系統縮約の進歩を論じておく。もちろん以下の各論で用いるためである。

負荷モデルの歴史

静的負荷モデル 系統解析の初期において、負荷は抵抗で模擬するしか実用的な方法がなかった。しかし負荷の電圧感度や周波数感度が系統安定度に影響すると認識されるようになった。負荷に正の電圧感度があれば、発電機加速時には送電潮流が増え、負荷は電圧低下し、消費電力が減少するので、送電潮流が一層増加し、系統安定度は悪化するであろう。また、負荷に正の周波数感度があれば、周波数上昇時に負荷は消費電力が増え、周波数変動を緩和し、系統動揺の制動力ともなる。従って系統安定度は向上するであろう。

これらに対応したものが静的負荷モデルである。米国では定インピーダンス (定 Z)、定電流 (定 I)、定電力 (定 P) 負荷の混合として表現している (ZIP 負荷) のに対し、わが国では次のような指数関数で表現している。

$$P = P_0 (V/V_0)^\alpha (f/f_0)^\gamma, \quad Q = Q_0 (V/V_0)^\beta (f/f_0)^\delta \quad (2.1)$$

遅くて小さい変動の観測結果から得られた $\alpha = 1, \beta = 2, \gamma = 2, \delta = 0$ という値が標準的に用いられている。定 P 特性の誘導機負荷と定 Z 負荷が半々に混合していれば $\alpha = 1$ となる。またポンプなどの機械トルクは

回転数の 2 乗に比例し、負荷の正の周波数感度の主たる源泉となっている。このような負荷モデルは、有効・無効電力が現在の電圧と周波数だけで決まり、過去の履歴に影響されず（これは非常に特殊性質である）、代数方程式で表現されることから、「静的負荷モデル」と呼ばれる。

静的負荷モデルは遅くて小さい変動を対象としたものゆえ、速くて大きい変動については信憑性が担保されない。その典型は系統故障である。シミュレーションにて故障を模擬すると収束不良が多発する。そこで、電圧低下中（標準的には 70%）には定 Z 負荷に変更するという措置がとられた。またハンチング防止のため元の負荷特性に戻る電圧を 80% にセットするという方策もとられた。これで収束不良やハンチングの頻度は大幅に減少した。ただ、この「定 Z への変更」は計算が中止しないための便法であり、現実の負荷が定 Z に変身しているわけではない。時代が下ると、「電圧が大幅に低下した場合には定 Z 特性に移行することが知られており⁽³⁾」という記述が見られるが、系統故障中に負荷内部コンダクタンス G が増大しており⁽⁴⁾、故障中も決して定 Z ではないことを観測事実は示している。

動的負荷モデル 20 世紀末、電力系統の安定度解析において、静的負荷モデルの限界が認識されるようになり、主に米国で動的負荷モデルが模索された。方法論として 2 つある。

第 1 は Component Based と呼ばれる手法で、実在する負荷機器の集合として負荷モデルを作る。機器の物理を保存できるという強みがある。反面、機器の混合比率は需要実態調査により求めるのであるが、季節、時刻、需要の大小、地域などによって変化し、これを限られた数のサンプリング調査から推定することは難しい。

第 2 は Measurement Based と呼ばれる手法で、負荷モデルを a priori (先験的) に仮定した関数で表現し、含まれるパラメータの値を観測により求める。観測結果を用いるという強みがあるが、観測は小変動が主体となり、a priori に仮定した関数の大変動時における正統性には疑問がある。

両派は熾烈な論争を繰り広げた。例えば文献(5)、(6)は典型的な Measurement Based の論文であるが、Component Based の側から熾烈な議論を挑まれており、論文末尾に本体の分量を超える Discussion がある。議論はすれ違いであるが、両派の主張の相違がよくわかる。

両派が互いに弱点を抱えていることは論者達も承知している。問題は両派の対立を aufheben (止揚) してくれる第 3 勢力がいつ登場するかであった。「もし現実の負荷の物理が保存される数学モデルが存在し、その数学モデルのパラメータが観測により同定できるならば」これまでよりずっと良い負荷モデルが得られるであろう。その第 3 勢力の登場は意外と早く、20 世紀末のことであった。文献(7)、(8)あたりが嚆矢である。21 世紀初頭には両派の争いは第 3 勢力による aufheben によって解消した。

同じ 20 世紀末、わが国では、P、Q は他の条件から結果的に定まる量ゆえ、変数として採るのは不適切であり、負荷内部コンダクタンス G を採るべき⁽⁹⁾との指摘がなされた。第 3 勢力の考え方に通じるものである。

観測機器の進歩 第 3 勢力の主張の前半「もし現実の負荷の物理が保存される数学モデルが存在し」は、誘導機負荷を含む Component Based の手法により実現した。後半「その数学モデルのパラメータが観測により同定できる」は Measurement Based の手法そのものであるが、これを実現するには観測機器の技術的進歩が大きく貢献した。

1970 年代までは、観測・記録機器としてはアナログ・オシログラフ（発明者の名を冠して「カルパンチェ」と呼ばれる）があるのみだった。文献(10)

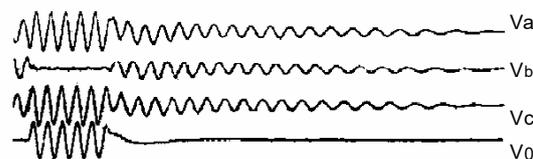


図 2.1 カルパンチェによる送電線故障の記録

は誘導機負荷が存在する証拠を 2 種類提示しているが、図 2.1 がカルパンチェの実例である。これは 154kV・2 回線送電線の両回線同相地絡故障によって当該送電線が供給している 154kV 変電所が停電したときのものである。60Hz の各相と零相の電圧波形が記録されている。故障除去からしばらく電圧が減衰しながら残留している。これは誘導機負荷が誘導発電機に転じているからであり、負荷中に多量の誘導機を含むことの有力な状況証拠になっている。

1980 年代に入ると電力動揺を記録するため有効・無効電力 (P, Q) および電圧 (V) の実効値と周波数 (F) を記録する「PQVF」という記録装置が導入された。文献(1)から電力動揺を記録した一例を図 2.2 に紹介する。

「PQVF」はデジタル値が得られて好都合なのであるが、時間分解能が 0.1 秒と粗いので、瞬時電圧低下（瞬低）時の記録には不十分である。文献(10)のもう 1 つの誘導機負荷の存在を示す証拠を図 2.3 に紹介する。これは 154kV・2 回線送電線の 1 回線 3LG-O 故障時の PQVF の記録である。故障は 0.1 秒で除去されているが、電圧が正常付近まで回復するのに更に 0.1 秒を要している。これは瞬低中に減速した誘導機負荷が速度回復する間、内部抵抗が非常に低くなるためである。

20 世紀末になってデジタル・オシログラフが登場した。商品名は例えば「多機能オシログラフ」という。本稿の例は 60Hz 用で、時間分解能は 1/3840 秒である。

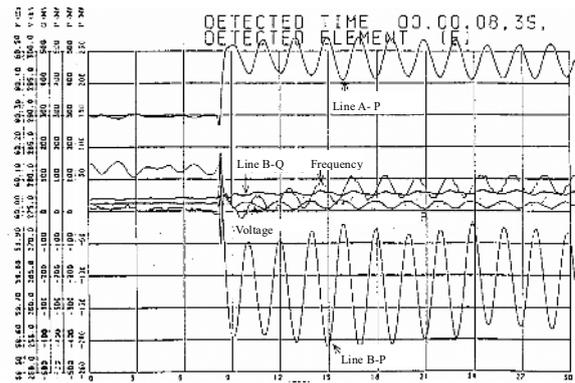


図 2.2 PQVF による電力動揺の記録

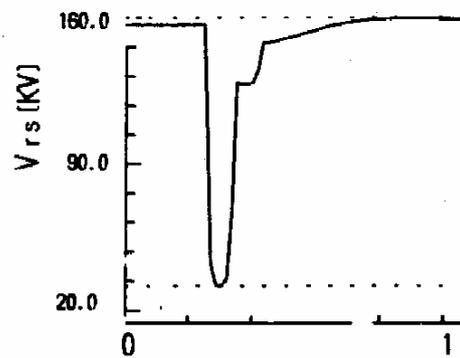


図 2.3 PQVF による瞬低の記録

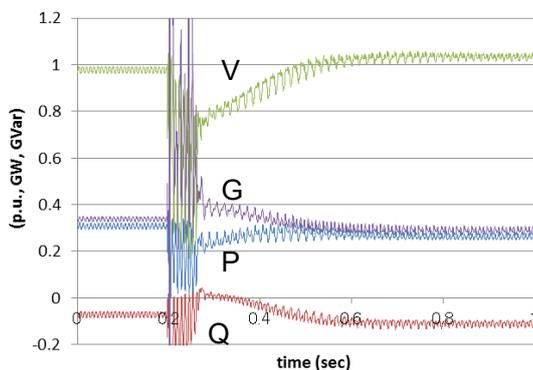


図 2.4 デジタルオシロによる記録(αβ変換)

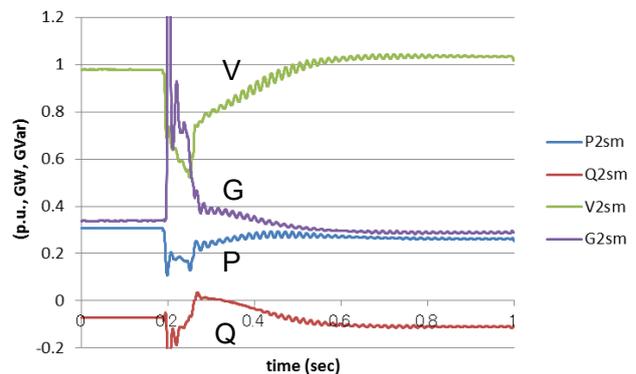


図 2.5 デジタルオシロによる記録(半波移動平均)

その記録は3相電圧・電流の瞬時値であり、実効値解析に供するようαβ変換を行ったのが図 2.4 である。本例は 2 相故障であり、故障中は逆相成分による速い変動が大量に現れ、故障除去後も少し残っている。これを除去するために交流半波の移動平均をとると図 2.5 のように鮮明な図形とデジタル値が得られ、かつ、応答遅れも目立たない。

動的負荷モデルの完成 このような観測機器の進歩を踏まえ、2005年に米国 EPRI が瞬低観測により動的負荷モデルを構築しようというプロジェクトを立ち上げた⁽¹¹⁾。大きな変動で多数得られるデータは瞬低だからである。わが国はこれに参加せず、また国内で同様のプロジェクトを実施することもなかったが、一部では動的負荷モデルの構築が行われた⁽⁴⁾。

その際に重要なのは、66kV 級母線に誘導機を含む負荷を「直付け」するのではなく、負荷端子に至るまでの現実の流通経路の縮約インピーダンスを経由させることが、実現象の再現性を担保する上で必須だということである。これをわが国 2006 年の文献(4)は「負荷ブランチ」と呼び、米国 2008 年の資料(12)は“Feeder Equivalent”と呼んでいるが、同じものである。これにより、瞬低後の電圧回復が遅れる現象が精度よく再現できるようになった。日米両国で同時期に独立して同じ結論に達したということは、信頼性の証左である。なおわが国の場合、66kV 級母線から負荷端子に至る縮約インピーダンスはおおむね $3.5 + j17.5\%$ (ピーク需要ベース) である⁽¹⁴⁾。

動的負荷モデルの構築は文献(13)、(14)で一応の完成を見た。近代的な動的負荷モデルは、図 2.6 のように、「負荷ブランチ」を経由して誘導機、抵抗、調相設備を並列に接続した負荷へ供給するモデルを用いている。ところが実は、このモデルは古くからあり、既に 1980 年の文献(2)が「負荷の一部を誘導機で表現し、関数表現では表わすことのできなかつた電圧、周波数変動に対する負荷の動特性を考慮した安定度解析を行う」と喝破している。文献(13)、(14)はこれに「負荷ブランチ」を導入して再現性を担保するという若干の進歩を示したにすぎず、しかもわが国では広く普及していない。1980 年以降の進歩の乏しさについては、わが国の電力系統解析に関わる技術者は大いに反省する必要がある。

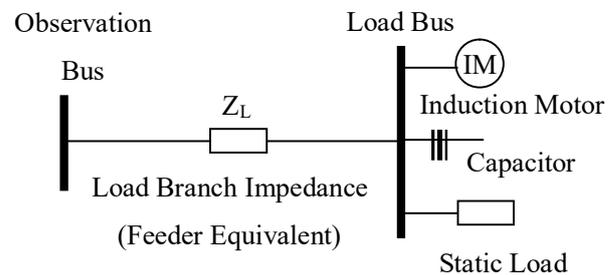


図 2.6 近代的な動的負荷モデルの構造

文献(13)、(14)はこれに「負荷ブランチ」を導入して再現性を担保するという若干の進歩を示したにすぎず、しかもわが国では広く普及していない。1980 年以降の進歩の乏しさについては、わが国の電力系統解析に関わる技術者は大いに反省する必要がある。

パラメータ同定技術の進歩

再現誤差の減少 誘導機および負荷ブランチの模擬という動的負荷モデルの構築方針ははっきりしたが、未知のパラメータは観測データを用いて求める必要がある。誘導機の定数は、平均的には狭い範囲に収まるから、サンプル調査で対応可能であり、すでに報告もある。但し、単位慣性定数(慣性)は、誘導機単体では 0.4 秒ほどであるが、軸に慣性の大きな機械的負荷が接続していると大きくなるので、同定を要する。他に、誘導機の比率(誘導機消費電力/負荷消費電力)、誘導機の負荷率(誘導機消費電力(kW)/誘導機容量(kVA))も同定を要する。また、負荷ブランチのインピーダンスも必要であるが、これは系統縮約によって求めることができる。よって観測データから求めるべきパラメータは誘導機比率、慣性、負荷率の 3 つである。

著者が現実的な負荷モデルの構築に取り組んだ当初は、当然のことと思って、適当な故障(例えば 2LG-3LO)を与えて瞬低の様相を再現しようとした⁽⁴⁾。一例を図 2.6 に紹介する。ここに G は観測点から見た負荷を定リアクタンス X 背後の可変コンダクタンス G と表現した値である。電圧 V は故障除去により一旦 80%弱まで回復するが、その後の回復は緩やかである。無効電力 Q は故障除去後の短時間、増大している。これらは多量の誘導機負荷の存在によるものであり、瞬低観測では例外なくこれらの傾向が見られる。動的負荷モデルでは観測事実をよく再現できている。細部で合致しないのは他の負荷の影響のためである。

これに対して静的負荷モデルでは V 、 Q 、有効電力 P とも、故障除去により一挙に最終値にジャンプし

た角ばった形を呈しており、観測事実とは全く異なる。わが国の技術報告⁽¹⁵⁾では瞬低時の電圧推移をこのような角ばった形で表現しているが、それを現実と勘違いしないよう注意を要する。

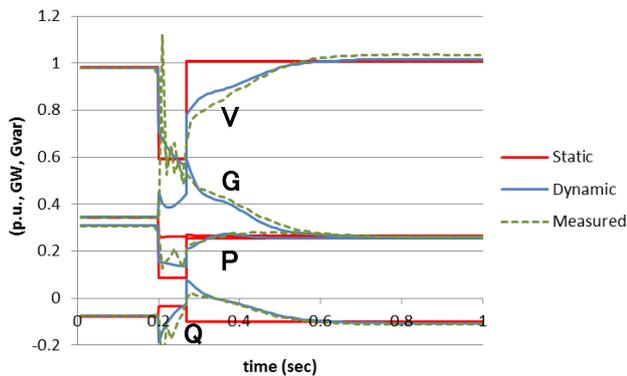


図 2.6 故障を与えての瞬低再現

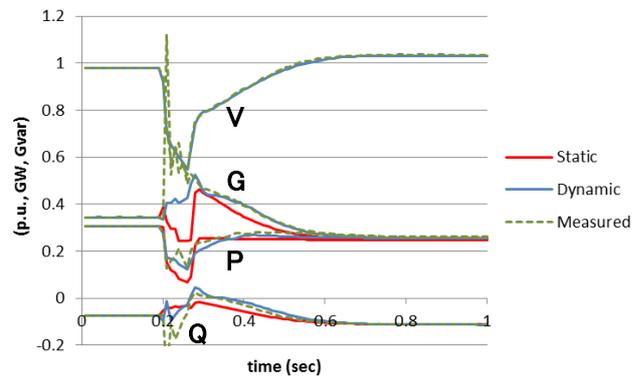


図 2.7 電圧を与えての瞬低再現

シミュレーションで P, Q, V, G の 4 変数を観測に合致させるのは、他の負荷の影響も受けるので、至難の業である。そこで観測電圧を与えて再現する。一例を図 2.7 に紹介する。これにより他の負荷の影響を排除でき、それまで実行不能だった再現が実行可能になった⁽¹³⁾。動的負荷モデルでは線が重なるほど観測結果をうまく再現している。

静的負荷モデルでは、そもそもこのような電圧様相にならないから比較すること自体が無意味かもしれないが、少なからぬ誤差がある。

負荷ブランチの抵抗分の考慮⁽¹⁴⁾ 著者の初期のパラメータ同定では負荷ブランチのリアクタンス分のみ模擬していた。これは、配電系統の抵抗分が不明だったからである。その後、配電系統の縮約を行い、配電網の縮約インピーダンスがピーク需要ベースで概ね $3 + j6$ (%) であることが判明した。これを織り込んだ負荷ブランチインピーダンスを算出すると図 2.8 のようになった。エリアによって大きな差異はなく、平均値は $3.5 + j17.5$ (%) である。

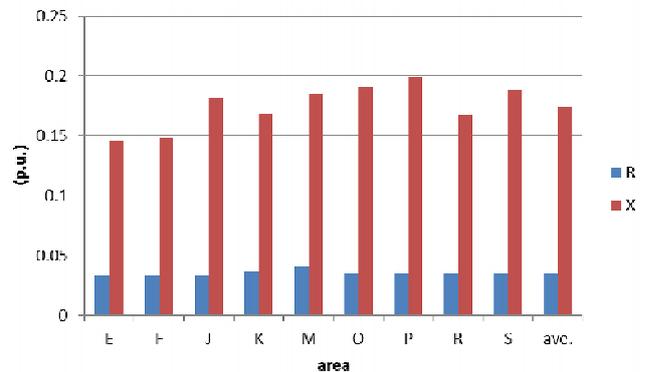


図 2.8 瞬低深さと同定数の関係

与える観測電圧の精度向上⁽¹⁵⁾ デジタル・オシロ

グラフによる観測電圧は 3 相交流電圧の瞬時値である。ツールは実効値解析用だから、この電圧を(疑似)実効値に変換する必要がある。著者の最初の方法(旧法)では図 2.4 の状態において、1/3840 秒刻みデータの頭から 38~39 個ごとにデータを 10msec 区間に区切り、各区間の平均値を以て区間の電圧とした。その結果、電圧低下の瞬間の俊度が低下した。また逆相成分の除去が不十分であった。改善した方法(新法)では図 2.5 の状態において、電圧低下直前の時刻を基準に、38~39 個ごとに 1 個のデータを選抜して 10msec 区間を代表する電圧とした。両者の相違の一例を図 2.9 に示す。10msec 刻みにする前の図 2.4 の状態 (V) に比べて旧法 (Vold) は遅れが生じているが、新法 (Vnew) では遅れはほとんど見られない。

与える実効値電圧の違いは、当然、パラメータ同定結果の違いに現れてくる。そこで旧法・新法に共通の同定結果 347 例について同定したパラメータ：故障前推定誘導機比率 (RM)、慣性 (MM)、および誘導機負荷率 (LM) を、ヒストグラムの形で比較した結果を図 2.10 に示す。いずれのパラメータも新法

の方がわずかに大きな値を示しているが、大きな差は見られない。これは、故障除去後の誘導機のふるまいが故障除去までの間の誘導機の減速量に強く支配され、さらにこの減速量が、電圧プロファイルよりは、瞬低の深さと時間の積の方により強く支配されるからではないかと思われる。

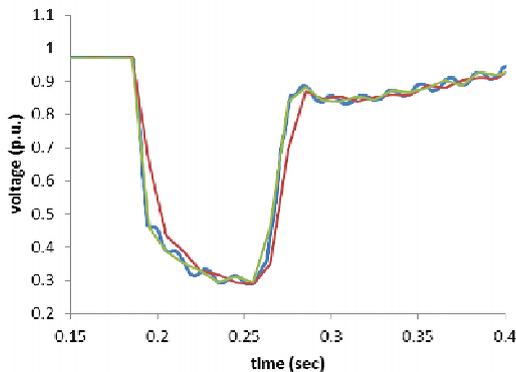


図 2.9 電圧プロファイルの誤差の改善

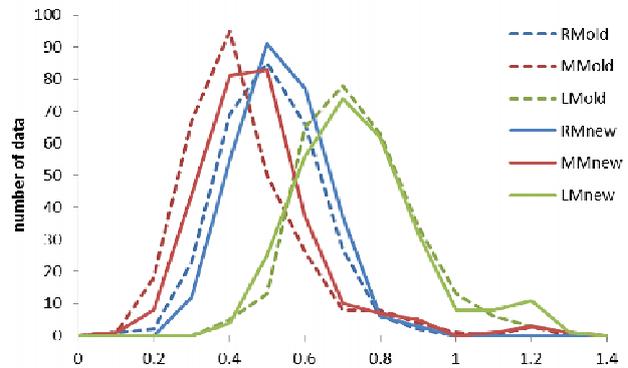


図 2.10 電圧プロファイルの違いの影響

同定不能の回避⁽¹⁵⁾ もっと大きな問題は、旧法では特に浅い瞬低の場合に同定不能となるケースが多かったことである。これはデータの有効利用の面で問題であるのみならず、同定不能が頻発する手法はそれ自体の信憑性に疑義がもたれかねないという面で問題である。

旧法では、誤差最小化により 3 個のパラメータ故障後の誘導機比率 RM、慣性 MM、負荷率 LM を求める際に、まず、ある LM を仮定し、MM-RM 平面において最少誤差を与える (MM_{opt} , RM_{opt}) を求めていたのであるが、RM が 0~1 の範囲内で最小値が求まらない事例が多発した。

これを考察するに、誘導機の動的ふるまいは、RM が大きいほど強く現れる。また MM が小さいほど速く、また強く現れる。従って誤差最小化において、RM 大と MM 小はトレード・オフの関係にあり、図 2.11 に示すように、MM-RM 平面において斜めに小誤差領域が発生する。RM が 0 と 1 の端に誤差を増加させる要因が小さいために、この範囲内での同定が不能になるのではないだろうか。

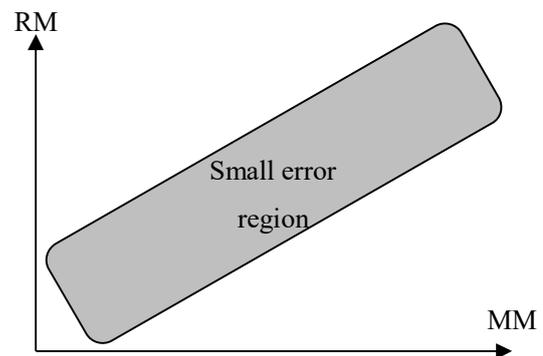


図 2.11 MM-RM 平面における少誤差領域

同定不能対策として新法では、パラメータ同定の順序を変更し、最初にある MM を仮定し、LM-RM 平面において最少誤差を与える (LM_{opt} , RM_{opt}) を求めるようにしたところ、同定不能に陥るケースは皆無となった。

これを考察するに、LM が小さいときは誘導機の容量が大きいため、磁束変化による動的ふるまいが極度に強く現れる。逆に LM が大きいのは、誘導機のすべりが大きくすべりによる動的ふるまいが極度に強く現れる。従って LM が大・小の端部において誤差大となるためと推察される。

2010 年度までに観測された瞬低 565 ケースで旧法・新法の双方でパラメータ同定を試みており、同定が成功した数と瞬低の平均深さ、標準偏差を表 2.1 に示す。旧法で同定できた数は 347 であり、対

表 2.1 同定数と瞬低深さ

	old	new only	new
N	347	218	565
m	0.232606	0.118631	0.19075
σ	0.124679	0.067341	0.120767

象 565 ケースの 61%にとどまっている。新法では全て同定できた。旧法で同定できず新法で同定できた数が 218 ある。旧法で同定できたケースの瞬低の平均深さは 23%と大きく、旧法で同定できず新法で同定できたケースの瞬低の平均深さは 12%と浅い。さらに、同定できたケースの数の瞬低深さについて層別化したヒストグラムを図 2.12 に示す。確かに浅い瞬低の領域において、旧法で同定不能、新法で同定可能となっているケースが多いことがわかる。

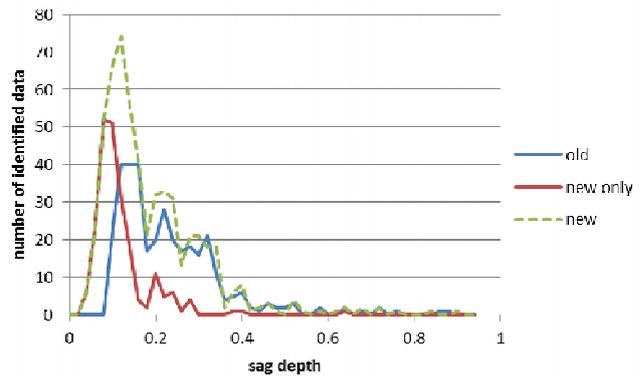


図 2.12 瞬低深さと同定数の関係

パラメータ同定結果⁽¹⁵⁾

瞬低に伴う一部負荷停止 図 2.8 では純負荷系統と見なしうる 9 地域を対象とした。しかし E 系統は系統切替により非常にしばしば有力なローカル水力電源を有する断面が生じる。F, S 系統は後年の系統変更もあって、M, R 系統の一部となる断面が多くなった。よってこれらを除外し、純負荷系統と見なしうる 6 系統を分析対象とした。期間は 2014 年度まで、対象は 974 件あり、新法はすべて同定に成功している。

まず、瞬低深さと負荷停止率の関係を図 2.13 に示す。注目すべきは、瞬低深さ 22%以下の領域で負の負荷停止率が現れていることである。これは 2007 年度までの結果を紹介した最初の報告⁽¹³⁾ではあまり見られなかった現象であり、再生可能エネルギー (Renewable Energy, RE) の普及によるものである。M 地域には風力発電が多く、FRT (Fault Ride-Through) 機能が未整備であるため、10%ほどの浅い瞬低で停止してしまう。他方、需要は深さ 20%程度の瞬低では容易に停止しない。

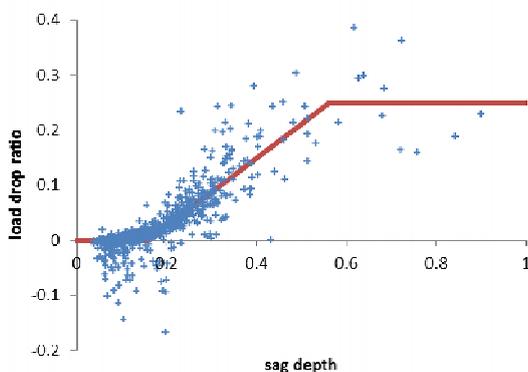


図 2.13 瞬低深さと負荷停止率の関係

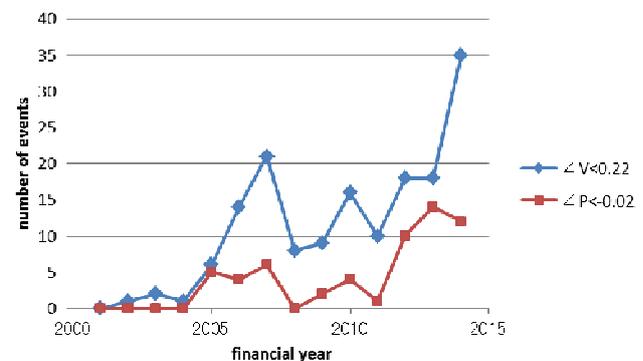


図 2.14 負の負荷停止率の年度推移

これをもう少し詳しく分析してみる。-0.02 未満の負の負荷停止を観測したのは、K 地域の 1 件、M 地域の 58 件、P 地域の 1 件である。このうち K 地域と P 地域の 2 件は-0.03 にまでは至っていない軽微なものである。したがって主要な負の負荷停止はほとんど M 地域で観測されている。これは M 地域に無視できない量の風力発電等が普及していることと無関係ではない。

M 地域で観測された深さ 0.22 未満の浅い瞬低の件数と負の負荷停止の件数を年度別に整理したのが図 2.14 である。負の負荷停止は 2007 年度から目立って増えてくる。2014 年度に至っても依然として負の負荷停止が多く観測されるのは、風力発電に実効ある FRT 機能が備わっていないことの証左である。2014 年度は浅い瞬低件数が多いのに負の負荷停止がさほど多くないのは実効ある FRT 機能が普及したことを

支持するかもしれないが、わずか 1 年のデータだけなので、確認のため、継続して観測していく必要がある。

瞬低前誘導機比率の推定 瞬低の再現で得られた動的負荷モデルのパラメータは故障後のものである。一般的には、停止した負荷と残存した負荷の誘導機比率が同じということはない。停止するのは主として誘導機なのか、それともその他の負荷なのかを知る必要がある。瞬低による負荷停止率と故障後の誘導機比率の関係を調べた事例を図 2.15 に示す⁽¹⁵⁾。

同図では負荷停止率が高いほど瞬低後の誘導機比率が高い。負荷停止率と瞬低前の誘導機比率に強い相関があるとは考えにくい。従って、「瞬低により誘導機は停止せず他の負荷だけが停止する」と仮定すれば、この傾向がうまく説明できる。同図で「誘導機以外の負荷だけが瞬低で停止する」と仮定して故障前の誘導機比率を試算すると、故障後よりも故障前誘導機比率が負荷停止率に対して平坦になっている。このことから、この仮定は信憑性があると判断できる。これは、わが国の誘導機の保護においては瞬低対策が進んでおり、モーターブレーカーまたは釈放遅延型の電磁開閉器になっているため、瞬低で誘導機が停止しにくいと考えられる。

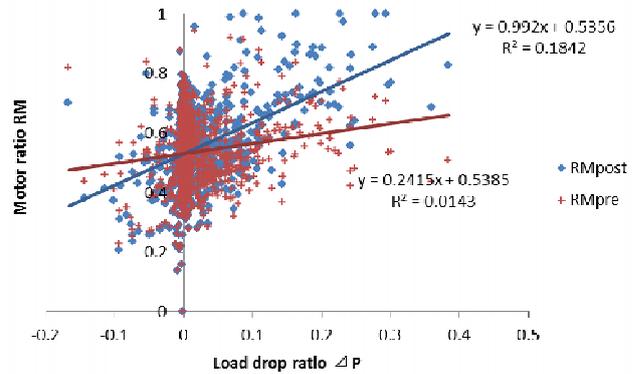


図 2.15 負荷停止率と誘導機比率の関係

同定された 3 パラメータ 3 個のパラメータの頻度分布は、0.1p.u.刻みのヒストグラムで、図 2.16 のようになった。傾向は 2010 年度までの図 2.10 と変わらない。

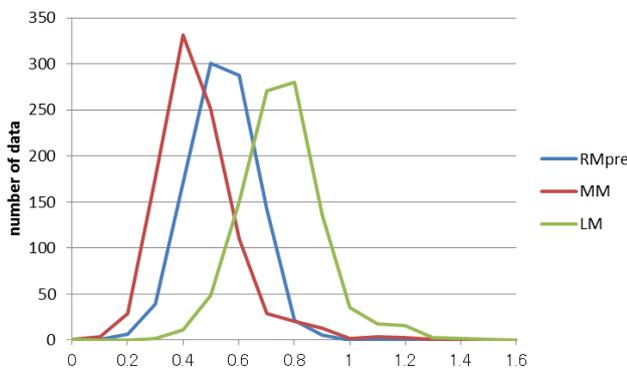


図 2.16 3 パラメータのヒストグラム

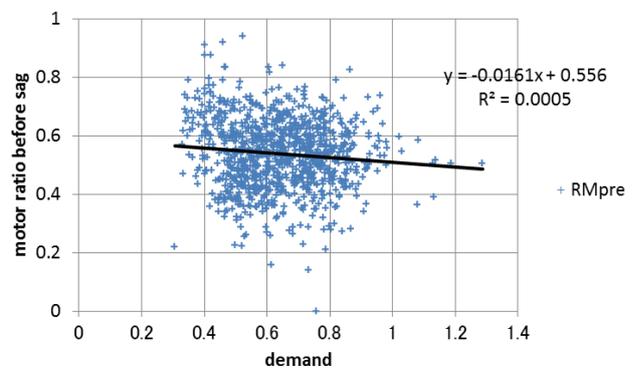


図 2.17 瞬低前の誘導機比率と需要の関係

瞬低前の誘導機比率と需要の関係をプロットした結果を図 2.17 に示す。需要によらずほぼ 50%強の誘導機比率となっている。図中、1 を超える需要が表われている。不等率で説明できるのは 1.1 程度までである。この図の需要は、目下の系統構成のままでピーク需要時を迎えた場合に現れるであろう「ピーク需要」に対する「現在需要」の比をとっている。この「ピーク需要」を推定するには毎斉時の需要実績を用いている。もし直近斉時に比べて瞬低時点の系統構成が拡張していれば、結果的に大きな需要が現れうる。実用的には 1 を超える需要は 1 と考えてよい。

誘導機慣性と需要の関係をプロットした結果を図 2.18 に示す。需要によらずほぼ 0.5 秒弱の慣性となっている。

誘導機負荷率と需要の関係をプロットした結果を図 2.19 に示す。誘導機比率や慣性と異なり、需要と

明確な負の相関がある。低需要時には約 0.8，高需要時には約 0.5 である。この傾向は次のように説明できる。低需要時に稼動している誘導機は排水ポンプなどのインフラストラクチャのものであり、ほぼ全負荷で運転している。高需要時には工業用のドリルやグラインダーなどの誘導機が加わるが、これらは多くの時間帯で空転しているため負荷率が低い。

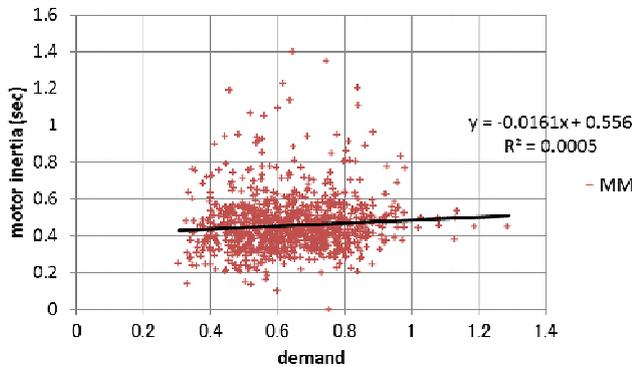


図 2.18 誘導機慣性と需要の関係

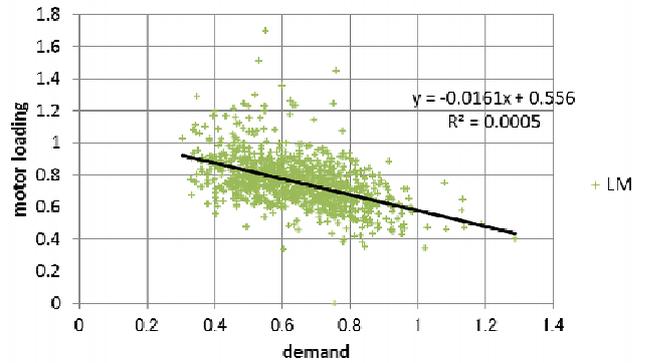


図 2.19 誘導機負荷率と需要の関係

3つのパラメータの年度推移を図 2.20 に示す。3パラメータとも僅かに減少傾向にある。誘導機比率が低下するのは、主にインバータ駆動の普及によるものであろうが、巷間言われているほど急速ではない。これはインバータ駆動されるのは精密加工などの用途に使われる誘導機が主体であり、数は多くとも単機容量は小さく、kW ベースでは大きな値にならないからである。

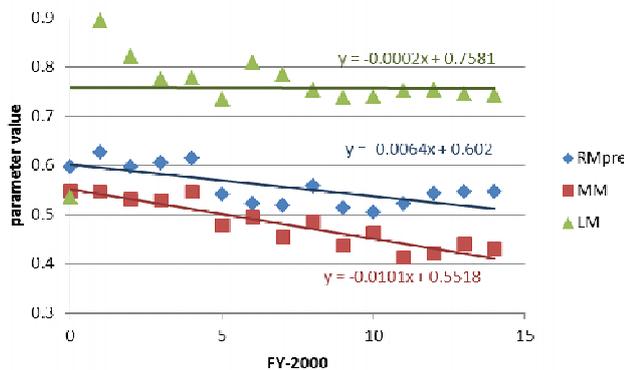


図 2.20 パラメータの年度推移

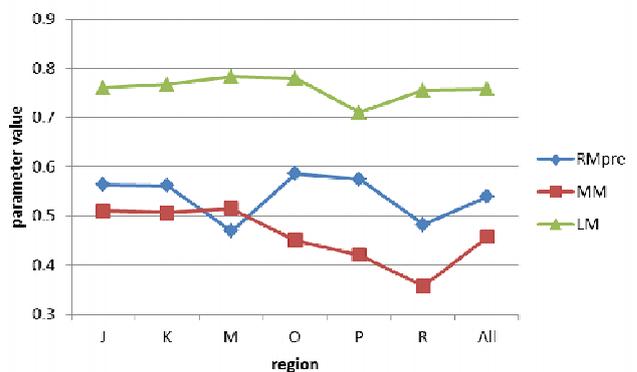


図 2.21 パラメータの地域差

3つのパラメータの地域差を図 2.21 に示す。M 地域と R 地域で故障前誘導機比率 RM_{pre} がやや小さい。R 地域で慣性 MM がやや小さい。P 地域で負荷率 LM がやや小さい。総じて地域差は目立たない。再エネが多く普及している M 地域の同定結果は他地域と大きく変わらない。

以上のことから系統解析に用いる誘導機負荷のパラメータは、瞬低前の誘導機比率を 50%，慣性を 0.5 秒とし、負荷率をピーク需要時には 50%，低需要時には 80% とすればよいことがわかる。

また、著者の瞬低観測とは別に、需要実態調査により、インバータ駆動されるものを含めた誘導機比率は、民間の調査で 57%⁽¹⁶⁾、行政の調査で 55%⁽¹⁷⁾ と報告されている。以上の三者の結果はよく一致しており、動的負荷モデルは完成の域に達している。しかし諸外国と異なり、わが国では電力の実務において動的負荷モデルは用いられていない。

なお行政は、誘導機負荷で使われる電力量の割合が高いという調査結果に鑑み、欧米に遅れて誘導電動機の効率向上を目標に掲げ、トップランナー方式を導入した⁽¹⁸⁾。

再エネ系統影響の評価に向けて

多くの先進国、途上国と異なり、独りわが国は今なお前世紀の静的負荷モデルを使用し続けている。静的負荷モデルを用いた電力系統モデルでは大量普及した再エネの副作用をスクリーニングできない。

なぜなら第一に、再エネのかなりの部分を占める太陽光発電 (Photovoltaic Generation, PV) はインバータ連系するが、これは定電流源であり、内部インピーダンスを有する定電圧源と定式化できる同期機に比べて系統の電圧維持能力に劣るからである。風力発電 (Wind Power, WP) でもフルコンバータ型は PV 同様にインバータ連系ゆえ同じ問題を持つ。さらに DFIG (Dually Fed Induction Generator) の制御性はフルコンバータ型に劣るから、むしろ WP の方が問題は深刻化もしれない。

第二に、電力系統を現実的にモデル化すると、誘導機負荷とおよび負荷に至る経路 (負荷ブランチ) のインピーダンスの模擬が避けられない。この現実的な電力系統モデルを用いると、誘導機負荷のストール現象という、これまで考慮されてこなかった不安定現象が無視できなくなる。

これら二つの大きな変化を考慮した場合に、解析結果が従来の結果とどう異なってくるかは精査されるべきであろう。しかるに、各方面で再エネ大量連系への対応策が練られているが、系統側のモデリングに注意を払っている事例は非常に少なく、著者の者も含めて学会論文に散見されるくらいであり、政府委員会に至っては皆無である。こういう状態で「いわゆる専門家」に再エネ大量連系時代の舵取りを委ねることに、著者は強い危機感を覚える。

文献

- (1) 駒見慎太郎:「電力系統モデルの検証の重要性について、仮想現実潜む魔物 - 電力系統シミュレーションの現状と課題 - 4」, 電気学会誌, Vol.132, No.12, pp.820-823 (2012)
- (2) 上之菌博・植田清隆:「Ⅲ. 電力系統の安定度解析」, 電気学会誌, Vol.100, No.1, pp.9-15 (1980)
- (3) 「電力系統の解析技術」, 電気協同研究, Vol.63, No.3 p.47 (2007)
- (4) 上田智之・駒見慎太郎:「物理的構造と観測データに基づく電力系統の動的負荷モデル」, 電気学会論文誌 B, Vol.126, No.6,, pp.635-823 (2012)
- (5) Cutsen, Mailhot: “Validation of a Fast Voltage Stability Analysis Method on the Hydro-Quebec System”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, Feb. 1997, pp. 282-292.
- (6) Xu, Mansour: “Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, Feb. 1994, pp. 479-493.
- (7) Ihara, Tani, Tomiyama: “Residential Load Characteristics Observed at KEPCO Power System”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 2, May 1994, pp. 1092-1099.
- (8) Wang, Chiang, Chang, Liu, C. H. Huang, C. Y. Huang: “Development of a Frequency-dependent Composite Load Model Using the Measurement Approach”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 3, Aug. 1994, pp. 1546-1556.
- (9) 山本将人:「系統電圧安定性解析のための動的負荷モデル」, 電気学会論文誌 B, Vol. 114, No.12, pp.1273-1279. (1994)
- (10) 駒見慎太郎・水野弘一:「負荷の特性と過渡安定度の関係」, 平成元年電気学会全国大会, No.1037 (1989)
- (11) EPRI: “Project Opportunity, Power System Load Modeling (PSLM)”, (2005)
- (12) NERC: “Fault-Induced Delayed Voltage Recovery” (2008)
- (13) H. Nagoya and S. Komami: “Parameter Identification of Induction Motor Load using Measured Data”, IEEE

Trans. PE, Vol.130, No.7 pp.633-639 (2010)

- (14) 水尾謙介・駒見慎太郎：「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」, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.1,, pp.71-76 (2012)
- (15) 「瞬時電圧低下対策」, 電気協同研究, Vol.46, No.3 p.16 (1990)
- (16) 富士経済：「電力使用機器の消費電力に関する現状と近未来の動向調査」 (2009)
- (17) エネルギー総合工学研究所：「平成 21 年度省エネルギー設備導入促進事業（エネルギー消費機器実態等調査事業）報告書」, (2010)
- (18) 阿部倫也：「国内トップランナー規制とモータ効率 IEC 規格」, 電学誌, Vol.137, No.5 pp.281-284 (2017)