2．電力系統の負荷モデル

電力系統モデルの何が問題か？

科学技術の世界では色々と計算します。賢者は歴史に学び愚者は体験に学ぶと言いますが，過去の観測データから色々な理論（つまり仮説）を打ち立てて人類の文明に貢献している科学は，賢者が歴史に学ぶという一面を持ちます。その計算をするには現実の現象を計算できるような数学モデルの形に整える必要があります。データそのものではなくデータの「関係」がモデルで，その関係を数式で表現すると数学モデルになります。

近代科学技術では計算の大規模化，高速化のニーズに応えて電子計算機が一般的に使われるようになりました。もちろんハードウェアはただの箱で，ソフトウェアを搭載して科学技術計算するわけです。このソフトウェアのことをよく「ツール」といいます。計算のための道具というわけです。このツールは数学の形式に整えた「モデル」を前提にしています。つまり近代的な科学技術計算はツールとモデルの 2 人の主役を必要とします。

計算には「エレガント」な計算と「腕ずく」の計算があり，どちらにもツールとモデルが必要です。電子計算機を使うシミュレーションは典型的な腕ずくの計算で，どちらかといえばツールの方が主役です。大学の電力系統の講座ではツールを自分で作ってみることに主眼を置いていると教員自身が語っています。科学技術計算ではモデルもツールに並ぶ重要性を持っているのですが，残念ながら大学教育ではモデルについては軽く扱われているようです。

大学を卒業して実務で科学技術計算をするようになると，世間には汎用ツールが数多く出回っています。ツールは多くの人が多くの目的に使うので，もしなにか不備があっても早期に改修されて，常に信頼度が高く維持されています。これに対してモデルは人により，目的により，様々なものが使われ，従ってその妥当性，信頼性はツールほどしっかりしていません。30 年も昔，シミュレーションが広まり始めた頃は，シミュレーションということ自身が信用されました。ところが現在はシミュレーションといえば眉唾の代名詞にまで信用が低下しています。

ツールは 30 年昔より現在の方が信頼度は高いか，少なくとも同等でしょう。となればシミュレーションの信頼性を低下させた犯人の候補はモデルです。もう 1 つ，シミュレーションの使い方の適否, つまりどんなケーススタディをしているか, またその結果を用いて何を主張しているか，という使い方の問題もありますが，使い方の適否は何も科学技術に限らないものですからここで扱う必要はないでしょう。電力系統の技術計算に用いているモデルに何か問題点があり，それが信用低下につながっているのではないか，という疑念が本章の主題です。

負荷のふるまいが盲点

電源設備，流通設備は電力会社の所有ですから，顧客に迷惑をかけない限り，自由に試験ができます。従って特性は詳細に把握できています。ところが負荷は顧客の需要設備の集合ですから，勝手に試験などできません。従って負荷の特性は昔も今もよくわかっていない，盲点になっている，というのが実態です。

著者がこの盲点に最初に気づいたのは 1985 年に観測された 2 つの事象によります。その第 1 を図 2.1 に紹介します。これは 2 回線送電線のうち 1 回線が短絡故障で停止したときの変電所における電圧の大きさを記録したものです。1 回線が生き残っているので停電はありませんが，深い

「瞬時電圧低下（瞬低）」が発生しています。

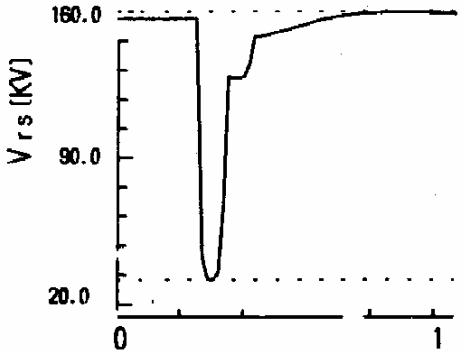


図 2.1　電圧回復遅れ

常識的には故障した 1 回線が除去された瞬間，図では故障発生から約 0.1 秒後に電圧は正常に戻るはずです。しかしそうはなっていません。電圧は 2 段モーションのような形で，もう 0.1 秒ほど低めに推移し，その後もやや時間をかけて正常値まで回復しています。

その第 2 を図 2.2 に示します。これは 2 回線送電線で 2 回線の同相が地絡故障で停止し，この送電線が電力供給していた変電所が停電したとき，この停電した変電所で記録した電圧波形です。上から 3 相交流の A 相，B 相，C 相の電圧波形で，地絡故障で B 相の電圧波形が 0.1 秒間（波 6 個）消滅し，他の A，C 相の電圧波形が大きくなっています。典型的な地絡故障です。

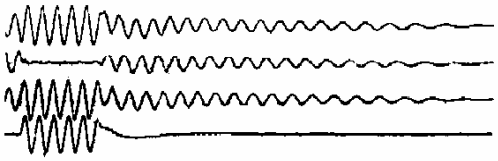


図 2.2　電圧消滅遅れ

常識的には故障除去，つまり停電と同時に電圧はゼロになりそうなものですが，この記録では 0.4 秒ほどかけてゆっくり消滅していきます。電源があればこういう事象もありうるのですが，停電した変電所の傘下には，自家発も含め，有力な電源はありません。

電力系統の分野では多くの予測計算をします。雷などの自然災害に遭遇しても顧客に大きな迷惑を及ぼさないよう信頼度を維持するためのものです。計算は現実の再現ができることが必要条件です。ところがここで紹介した 2 つの観測事例は従来の計算方法では再現できませんでした。それで現場が一大事とばかり著者のところへ持ち込んだという次第です。

なんでこんなことが「一大事」なのでしょうか。それは科学が少量の「事実」に多量の「仮説」を加えて何とか現実に起きている事象を説明しているからです。その仮説ですが，科学が科学である所以は仮説の「反証可能性」にあると 20 世紀の科学哲学者カール・ポパー（1902-1994）が喝破しました。仮説が「クロ」であるという観測事例が 1 個でも発見されたら，その仮説はもう駄目だということを潔く認めるのが科学と科学者の態度であるというわけです。また科学の仮説は反証可能なように表現されていなければいけないということです。

つまり，当時の現場の人々は，自分たちが行っている予測計算方法で説明できない事象が 2 つも出てきたので，この計算方法を使い続けて大丈夫なのかと心配になったのです。1985 年当時は

現場の人々もポパーなど知らなかったと思います。にもかかわらず，科学的に正当な対応をした当時の現場の人々の力量に，今になって感心している次第です。

2 つの事象を突きつけられた著者には，しかしながら，思い当たる節がありました。負荷，つまり顧客が使う電気製品の集合には少なからずモーター（誘導電動機, Induction Motor, 略して IM）が含まれております。ところがこれまでの計算は負荷にはモーターがないという「旧仮説」に基づいております。そこで電気の半分かそれ以上がモーターで消費されているという「新仮説」に基づき計算してみると 2 つの事象の傾向は再現できました。しかし当時の観測機器はお粗末なもので，2 つの図に示した程度の情報しか得られません。どのようなモーターがどのくらい存在するのかを突きとめるには，もっと高度な観測機器が必要です。この願望は後年かなえられ，1998 年頃から配備されるようになりました。観測結果は以降の説明で大活躍します。

なぜ著者がモーターの存在に敏感になっていたかも説明を要します。1987 年以降，外部の大型電源から連系線を経由して多量の電力を融通受電する計画があったからです。連系線とは電力系統同士を連絡する送電線のことで，常時は大きな電力を流さず，非常時に使って大規模停電を回避しようというものです。この連系線を常時使ってしまうとマージンが減ります。それで大丈夫なのかというのが当時の大命題だったわけです。電力の流れは受電，つまり外部から内部です。こういう場合，電圧安定度が問題になります。電圧安定度はモーターが多いと深刻になります。

結局のところ，当時の最大需要 3000MW に対し 280MVA のコンデンサを配備し，系統電圧が低下したときに「無効電力予備力」として使えるようにしておくことで十分安定が保てると判明し，1985 年から 87 年にかけて導入が完了しました。その 1987 年の夏です，関東西部で電圧崩壊による大停電が発生したのは。当時著者は水力発電の現場で工事をしていましたが，著者の心配が他社で現実のものになった，コンデンサを配備しておいてよかった，と思いました。当時，電圧維持のための予備力としてのコンデンサを配備していたのは著者が奉職する電力会社だけでした。以後，この種のコンデンサは必要と認識されるようになりましたが，関東西部の電圧崩壊が変圧器タップ動作だけで一応説明がついたため，負荷に多量に含まれるモーターの問題は大きく取り上げられないまま現在に至っています。惜しいチャンスを逃したと思います。

動的負荷モデルの歴史

こうしてわが国では最近まで電力系統の負荷にはモーターを意識しない「静的負荷モデル」を使い続けてきました。静的とは，過去の履歴に影響されないものとし，負荷の消費電力は現在の電圧と周波数だけで決まるとする意味です。これに対して海外は過去の履歴に影響される，つまり負荷の消費電力が過去の電圧・周波数などにも影響されるとする「動的負荷モデル」に切り替わっております。どういう動的負荷モデルが良いか，過去の履歴の影響の仕方をどう考えるかによって様々な仮説が提案され，20 世紀末，2 大派閥が大論争を繰り広げました。面白いので紹介します。

第 1 は“Component Based Method”なる手法です。要素に基づく手法，とでも訳せばよいのでしょうか。この派閥は負荷モデルを実際に存在する電気機器の数学モデルの集合として作ります。そして電気機器の混合比率を，需要家を調査して求めます。電気機器として最も重要なのがモーターです。最も動的なふるまいをするからです。リアリティーに富む手法ですが，難点もあります。それは電気機器の混合比率です。季節，時刻，需要高低，地域などの要素によって変化する

でしょう。それを数少ないサンプリング調査から大胆に推定して大丈夫なのでしょうか。反対派はそこを突きます。

第 2 は“Measurement Based Method”なる手法です。観測に基づく手法，とでも訳せばよいのでしょうか。この派閥は負荷モデルを a priori に設定した，例えば $P = p(V, f)$　$Q = q(V, f)$ というような関数で表現します。1 次の進み・遅れ回路で模擬している論文が多いようです。そしてその関数の係数を観測から同定します。瞬時電圧低下や変圧器タップ変動のような小外乱時の負荷のふるまいを観測している論文が多いようです。観測結果を反映できるという強みはありますが，a priori に定めた関数の大外乱時における正統性・正当性は疑問です。反対派はそこを突きます。

20 世紀末，両派閥は熾烈な論争を繰り広げました。例えば文献(1)，(2)は典型的な“Measurement Based Method”の論文ですが，“Component Based Method”の側から熾烈な議論を挑まれている様子が論文本体の後に付いている Discussion の記事からよくわかります。論文本体より Discussion の分量が多いこともあります。議論はすれ違いですが，両派の考え方の相違はよくわかります。

両派閥が互いに弱点を抱えていることは論者達も承知しています。問題は両派の対立を aufheben してくれる第 3 勢力がいつ登場するかです。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しょう。その第 3 勢力の登場は意外と早く，20 世紀末のことでした。文献(3)，(4)あたりが嚆矢でしょう。Discussion には Concordia や Pal といった大御所の肯定的意見が掲載されています。

21 世紀の今日，もはや両派の対立は解消しており，Measurement Based が敗北，モーター派が世界制覇しています。著者が 2006 年に発表した「負荷までの流通経路の考慮も含めたモーターを含む動的負荷モデル[(5)]」と同じものが，2008 年の米国電気学会において，FIDVR（Fault-Induced Delayed Voltage Recovery，故障による遅い電圧回復）現象を説明できるモデルとして広く認識されるようになっています（本格論文はまだ現れていないようですが）。その他の多くの国でも既にモーターを含む動的負荷モデルを用いた解析が普通に行われるようになっています。

最近のわが国では，学会では文献(6)，(9)以外に目にしておりませんが，1 つの特徴的な動きとして 2009～2010 年に行政および民間で需要実態調査結果から，電力の何％がモーターで消費されているか（モーター比率）を推定しています。インバータ駆動のものも含めてモーター比率は 55％（行政）あるいは 57％（民間）と推定しています。これだけ多くの電力がモーターで消費されているのだから，モーターもまたトップランナー方式で省エネ化を図らなければならないという結論に至っております。著者が瞬時電圧低下現象から推定した結果では，インバータ駆動のものを除いたモーター比率は 50％であり，行政・民間の需要実態調査の結果からインバータ駆動のものを控除した値とほとんど一致します。3 者が独立して求めた結果が一致しているからには信憑性は高いでしょう。

モーター比率が 50％もあるのなら，モーターが特に動的なふるまいをする負荷であることは既に分かっているのですから，電力系統の負荷を「モーター」と「それ以外」の 2 種類に層別化してモデル化することの妥当性は既に十分高まったと言えるでしょう。しかしこれまでのわが国の学会・業界の静的負荷モデルへの執着，動的負荷モデルへの反発には何やら異様なものを感じます（過去にどういう経緯があったか知りませんが）から，道のりはまだ長いかもしれません。

電力系統の動的負荷モデル

これまでの議論を踏まえると電力系統の負荷の構造としては図 2.3 のような，最も動的な要素であるモーターと最も静的な要素である抵抗に，力率を合わせるためのコイルもしくはコンデンサを加えたモデルがよさそうです。但し，負荷は広範囲に分布する多くの電気製品の集合で，我々にわかるのは観測点から見たふるまいだけです。観測点から電気製品に至る流通経路には交流の流れを妨げる抵抗成分とコイル成分があります。そこで観測点から集合的負荷に至る経路の両成分，すなわちインピーダンス（妨げるものという意味）Zs を模擬します。

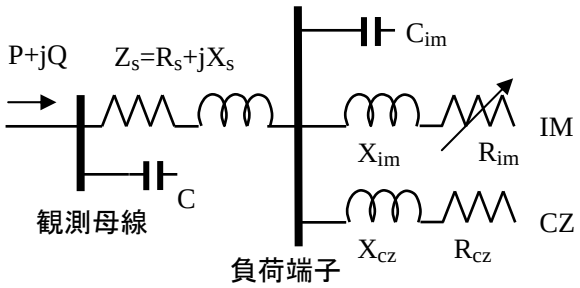


図 2.3　動的負荷モデルの構造

図ではモーターの負荷インピーダンスを次のように，定リアクタンス X_{im} 背後の可変抵抗 R_{im} として表現しています。

$$Z_{im} = R_{im} + j\, X_{im}$$

同様に定インピーダンス負荷は次のように，定リアクタンス X_{cz} 背後の定抵抗 R_{cz} と表現しています。

$$Z_{cz} = R_{cz} + j\, X_{cz}$$

両者を混合したときの負荷全体のインピーダンスは次のように，可変リアクタンス X_{all} 背後の可変抵抗 R_{all} として表現されるものとします。

$$Z_{all} = R_{all} + j\, X_{all}$$

当然ですが，次の関係があります。

$$\frac{1}{Z_{all}} = \frac{1}{Z_{im}} + \frac{1}{Z_{cz}}$$

モーター負荷の抵抗 R_{im} は，定常状態の 1 から，完全停止状態の 0 まで変化します。他の抵抗・リアクタンスは一定です。正常状態ではリアクタンスは抵抗の 10%ほどです。そこで正常時の負荷全体のインピーダンスを $1 + j\,0.1$ とし，モーター比率を K とします。モーター内部抵抗 R_{im} を正常状態を 1 と規格化して表現したとき，任意のモーター内部抵抗における負荷全体のインピーダンスは次のように表現できます。

$$\frac{1}{Z_{all}} = \frac{K}{R_{im} + j\,0.1} + \frac{1-K}{1 + j\,0.1}$$

R_{im} を 1 から 0 まで変化させたときの負荷全体の抵抗 R_{all} とリアクタンス X_{all} を計算してみます。その際，各種モーター比率をパラメータとして仮定してみましょう。計算結果は図 2.4 のようになりました。後の章で述べますが，モーターがストールした状態では内部抵抗が正常時の約 40%にまで低下します。従って図ではモーター内部抵抗 R_{im} の範囲は 0.4 から 1.0 に着目すればよいわけです。負荷全体の抵抗 R_{all} はモーター比率 50%以上になるとモーター100%とそう大きく違いません。負荷全体のリアクタンス X_{all} はモーター内部抵抗 R_{im} が 1 から 0.4 までの範囲ではほぼ 0.1 で，大きく変化しません。

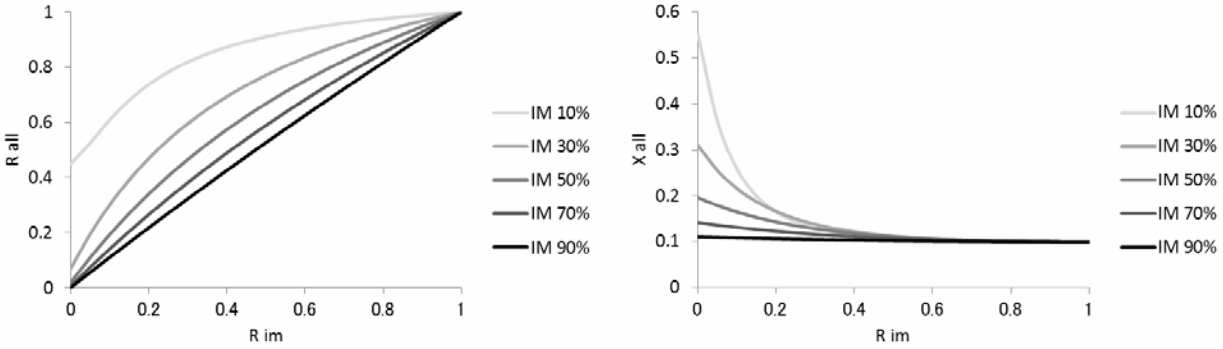


図 2.4　動的負荷モデルの抵抗とリアクタンス

以上のことから，もしモーター比率が 50%以上であるならば，負荷全体として 100%モーターに近いカーブになっています。だからといって 100%モーターとほぼ同じふるまいをすることになるとは限りません。定インピーダンス負荷は電圧低下に伴い消費電力が大きく減少するので，モーターに回せるパワーが増え，モーターの減速が緩和されます。従って定インピーダンス負荷の割合が多いほど，つまりモーター比率が少ないほど，モーターの減速は緩和されることになります。ただ，減速の進み方は違っても，そこまで減速してしまえば 50%モーター負荷と 100%モーター負荷の抵抗とリアクタンスは，そう違わないということです。

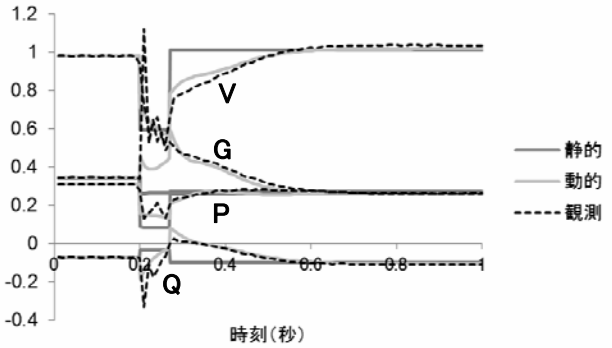
そう考えると，現実の負荷のモーター比率が 50%以上あるか・ないかが，大げさに言えば運命の分かれ目ということになります。そこで現実の負荷のモーター比率が知りたくなるのですが，方法には 2 つあります。第 1 は著者の方法で，瞬時電圧低下などの擾乱時の負荷のふるまいをよく再現するようパラメータを同定するもので，以下に詳細を述べます。第 2 は政府・民間の調査の方法で，需要家の負荷機器をサンプリング調査するものです。各々一長一短がありますが，第 1 の方法はモーター比率以外のパラメータも求めうるのが長所で，系統解析のために十分な情報をもたらすのは第 1 の方法です。

負荷が反応する程度の大きさの故障で件数が多いものは「瞬時電圧低下」と呼ばれる現象です。略して「瞬低」と呼ばれることも非常に多いので，覚えたほうがよいでしょう。2 回線送電線に落雷があって 1 回線が停止すると，残る 1 回線があるので停電にはなりませんが，故障発生から故障クリアまでの 0.1 秒ほどの間，電圧が低下します。これが瞬低です。瞬低があると負荷は反応します。負荷の動的ふるまいを再現する場合は外部の故障による瞬低に限定する必要があります。外部の故障では観測点以下の電圧推移の場所的な違いは大きくありませんが，内部の故障では場所的な違いが大きく，推定誤差が大きくなってしまいます。

広域電力系統モデルにおいて故障点と推定される地点に故障を与えて再現計算したのが図 2.5 です。わが国の実務で広く使われている静的負荷モデルは負荷の有効無効電力を次のように仮定

しております。ある時刻 t での有効・無効電力は，その時刻 t の電圧・周波数で決まります。

$$P(t) \propto V(t)^{\alpha} f(t)^2, \quad Q(t) \propto V(t)^{\beta}$$



負荷パラメータ

静的負荷モデル

$\alpha = 1.0$

$\beta = 2.0$

動的負荷モデル

モーター比率　70%

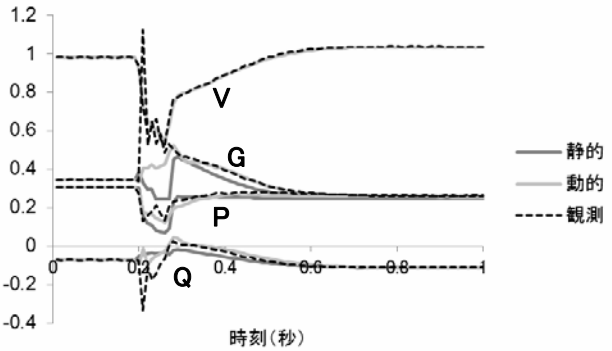
モーター慣性　0.5 秒

モーター負荷率　50%

図 2.5　故障を与えての瞬低再現

普通に使われる静的負荷モデルは$\alpha = 1$，　$\beta = 2$ というものですので，ここではそれを踏襲します。図では静的負荷モデルの場合は電圧 V，コンダクタンス（抵抗の逆数）G，有効電力 P，無効電力 Q の全てが四角い形になっており，現実とは相当違います。これを以て「静的負荷モデル仮説」は明確に反証され，仮説としての命は終わりというのが科学の常道ですが，この静的負荷モデルは反証された後もまだ実務で生き続けております。

モーターを模擬した動的負荷モデルは現実をまあまあ再現できていますが，微妙に違います。広域電力系統モデルを用いる以上，分析対象にしている負荷以外にも負荷があり，それらの影響を受けます。



最適負荷パラメータ

静的負荷モデル

$\alpha = 0$

$\beta = 0.5$

動的負荷モデル

モーター比率　68%

モーター慣性　0.47 秒

モーター負荷率　62%

図 2.6　電圧を与えての瞬定再現

分析対象とする負荷だけを切り出して分析するには，観測点の電圧を与えて負荷の応答を調べればよいでしょう。結果を図 2.6 に示します。電圧の再現性に配慮しなくて済むので，負荷モデルのパラメータを調整して再現誤差を最小化することも可能になってきます。元々再現性の良い動的負荷モデルの改善は少なく，静的負荷モデルの再現性のは改善は大きくなっています。これは故障を与えると電圧が四角い形になってしまうという静的負荷モデルの宿命から逃れられたことと，静的負荷モデルであってもパラメータの調整をして誤差を減らすことができたからです。同定された（再現誤差が最小となった）最適負荷パラメータも図に併せて示しますが，静的負荷モデルの場合，一般的に使われている$\alpha=1$，$\beta=2$ よりも随分小さい値に，つまり定電力性の強い設定になっております。この計算では負荷に近い観測母線の電圧を与えているので計算可能ですが，普通の系統シミュレーションでは電圧を与えているのは負荷からずっと遠い電源であるため，

このような定電力性の強い静的負荷モデルを使うと収束不良（NC，Not Convergent）になって，シミュレーションの途中で計算が止まってしまいます。この最適な静的負荷パラメータは最後まで計算できたもののうち誤差最小のものであり，本当はもっと定電力性を強めた方がよい兆候はあるのですが，計算できなくてはしかたありません。こういう事情があるので瞬低という観測事実を再現する試みが嫌われてきたのではないかと思います。現在でも収束不良が発生しにくいα=1，β=2 というパラメータの静的負荷モデルを使い続け，再現性が悪い面には目をつぶっているというのが偽らざる姿だと著者は思います。こういう状況ですから，計算している側は自信が持てず，報告される側は疑いを晴らせず，結果的にシミュレーションという有用な方法自体が信頼を喪失する羽目になったと著者は見ています。

さてこれまで故障 given と電圧 given，静的負荷モデルと動的負荷モデルという 2×2＝4 通りの再現誤差を見てきました。これをまとめると図 2.7 のようになります。P，Q，G の 3 種類の変数について，故障クリアの 0.27 秒から変動が落ち着いた 0.7 秒までの時刻の RMS 誤差を示します。動的負荷モデルの再現性のよさがわかると思います。

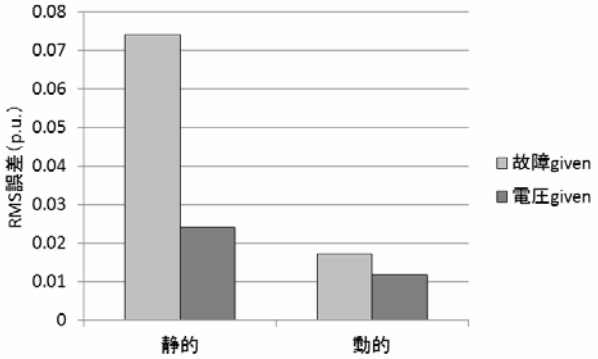


図 2.7　再現誤差の比較

系統パラメータの推定 (7)

話が前後するのですが，負荷パラメータ同定の前に推定しておく系統パラメータが 2 個あります。観測点から負荷までのインピーダンス Zs と観測点に設置されているコンデンサ量 C です。

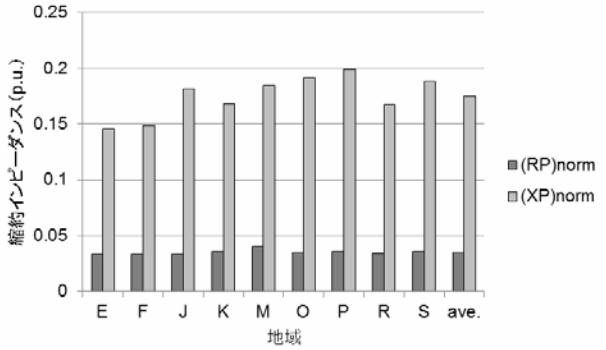


図 2.8　地域ごとの系統インピーダンス

このインピーダンス Zs は，ここでは系統インピーダンスと呼ぶことにします。2008 年の米国電気学会では Feeder Equivalent（フィーダー等価物）と呼んでおりますが，なるほどという良い名称と思います。この Zs は後に述べる系統縮約という手法で求めることができます。対象になるのは純負荷系統なので，グリッドの抵抗・コイル成分による有効・無効電力ロスが保存されるようにすればよろしい。ここでは 9 個の地域系統を題材にとっており，各々の正規系統での Zs を，ピ

ーク需要時ベースで図 2.8 に示します。(RP)norm が 3%ということはピーク需要時に 3%の有効電力ロスがあるということです。(XP)norm は(RP)norm の 6 倍程度あります。

正規系統のインピーダンス(RP)norm + j (XP)norm はわかったのですが，作業などのニーズのため，電力系統は非常にしばしば臨時系統を構成します。臨時系統のインピーダンス(RP)temp + j (XP)temp は次のように推定すればよいでしょう。

$$(RP)temp + j\,(XP)temp = \frac{ALCnorm}{ALCtemp}\{(RP)norm + j\,(XP)norm\}$$

ここに当該地域系統需要が全形需要に占める配分を，正規系統で ALCnorm，臨時系統で ALCtemp としております。つまり系統インピーダンスは需要配分に反比例すると仮定しております。停電している需要がない場合には，この仮定は現実性があると思います。

但し，低需要時にピーク需要の何割にまで減少するかは地域によって差があります。そこで，この臨時系統のまま全系ピーク需要を迎えたならばこの地域の需要配分はいかほどになるかを推定する必要があります。全系需要と J 地域の需要配分の関係を図 2.9 に示します。J 地域は典型的な商業地域なので夜間などの低需要時には他の地域よりも需要減少が著しくなっております。従って全系需要が低いときには J 地域の需要配分を高めに修正する必要があるというわけです。

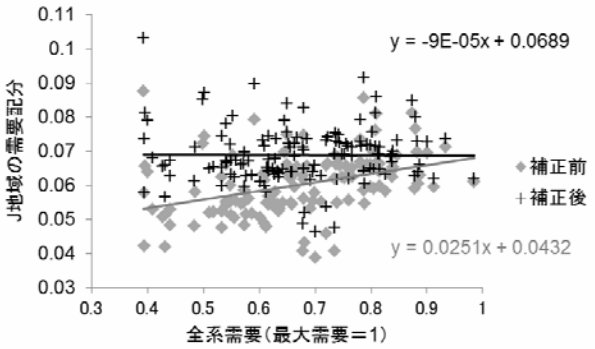


図 2.9　J 地域への需要配分と全系需要の関係

次に観測点のコンデンサの量 C ですが，普通は一次変電所の 66kV 級母線を観測点にとります。ここには大量のコンデンサが配備されているので図 2.3 の構造は現実味があります。そこのコンデンサ量は記録があるのですが，負荷端子のコンデンサの他に，他の変電所の 66kV 母線，6.6kV 母線，負荷端子にもコンデンサがあり，これらを 2 箇所（66kV 母線，負荷端子）に集約しているので，C としては記録にある量より多めに設定する必要があります。

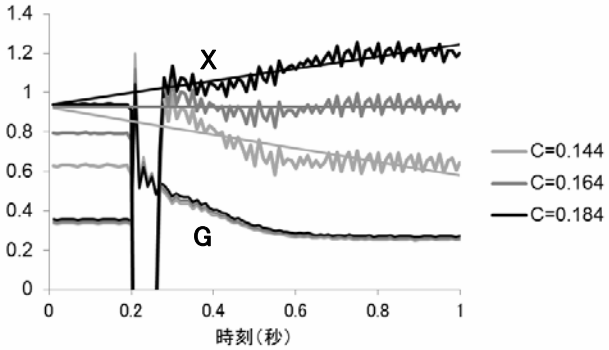


図 2.10　G と X の時間推移と C の関係

そこで瞬低後の，観測点から負荷を見たインピーダンス

$$Z = (1/G) + j\,X$$

の時間的変化に注目します。G，X は次のように算出されます。

$$G = \frac{P^2 + (Q + CV^2)^2}{P\,V^2} \quad 、 \quad X = \frac{(Q + CV^2)\,V^2}{P^2 + (Q + CV^2)^2}$$

ここで，C を適切な値に設定すると，図瞬低 2.10 に示すように，後の X の時間的推移がほぼ平坦になります。瞬低による負荷の動的な応答が内部抵抗の低下だけだと考えれば（現実はモーターの励磁電力も動的に応答するので多少異なっていますが）確かに平坦になるはずです。他方，G は C の値にほとんど影響されません。これは助かりました。G はモーター負荷のパラメータ推定に重大な役割を演じます。こういうやや不確かな推定法で G の値が大幅に変わるようでは，パラメータ推定の信頼性が疑問になってしまいます。ここでは観測事実から C を推定したのですが，66kV 級母線のコンデンサ総量を C に，その他を Cm にしておいても，特に問題はないと思います。

モーターのパラメータ推定 (7) (8)

モーターの諸定数のうち慣性，抵抗，リアクタンスは 30 年ほど前の調査結果があり，10kW 級以下の小型モーターでは表 2.1 のように報告されておりますので，これを踏襲します。

但し慣性 Mm だけは軸に直結する機械的負荷の慣性を加える必要があります。また 30 年の技術進歩により 0.4 秒より少し軽量化されているかもしれません。従って観測データから同定することにします。

表 2.1　モーターの標準定数

Mm	X1	X2	Xm	R1	R2
0.4 秒	0.1	0.1	2.3	0.04	0.04

その他に重要 2 個のパラメータがあります。第 1 は言うまでもなくモーター比率 Rm，電気の何%がモーターで消費されているかです。第 2 はモーター負荷率 Lm です。モーターの容量目一杯で使われることはなく，モーター消費電力（kW）が容量（kVA）の何%になっているかが負荷率です。

パラメータ同定法には様々なものがありますが，ここでは原始的だが確実な，次のような方法を用いています。

① まず Lm，Mm を固定して Rm を何通りかに変化させたときの誤差を計算します。結果を下に凸な 2 次曲線で近似します。Rm 最小誤差とそれを与える Rm がわかります。

② 次に別の Mm について Rm 最小誤差とそれを与える Rm を求めます。何通りかの Mm について最小誤差とそれを与える Rm の組を得て，その結果を下に凸な 2 次曲線で近似して，Mm 最小誤差とそれを与える Mm，Rm がわかります。

③ 最後に別の Lm について Mm 最小誤差とそれを与える Mm，Rm の組を求めます。何通りか

の Lm について最小誤差とそれを与える Rm，Mm の組を得て，その結果を下に凸な 2 次曲線で近似して，Lm 最小誤差とそれを与える Lm，Mm，Rm の組がわかります。

この方法は最も原始的なもので，労力が多く，最小値から外れたパラメータについての計算を数多く行うので士気が上がらず，あまり好ましくないものではありますが，仮定する負荷率，慣性，比率の間隔さえ適切に設定してやれば，（経験的にではありますが）最小誤差が存在する場合には確実に求めうるという信頼性が魅力です。現実に数百事例に対してこの方法で最小誤差とそれを与えるパラメータが求まらなかったことはありませんでした。

ここで注意しなければならないのは，得られたモーター比率 Rm は瞬低後のものだということです。一般に瞬低では深さが 20%以上になると相当な量の負荷が一時的に停止します。停止する負荷のモーター比率が瞬低後のモーター比率と同一なら，瞬低前のモーター比率も同じ値になりますが，そうである保証はどこにもありません。そこで瞬低に伴う負荷停止率によってモーター比率がどう違っているかをプロットした結果を図 2.11 に紹介します。負荷停止率が高いほどモーター比率が高くなる傾向があります。これは常識的におかしい。そこでこの結果を合理的に説明する作業仮説「瞬低で停止するのはモーター以外の負荷ばかりである」を採用してみます。この仮説により瞬低前のモーター比率が計算できますので，これも併せて図に示しましたが，傾向線の傾きは随分緩やかになっており，作業仮説が妥当であることを示しています。

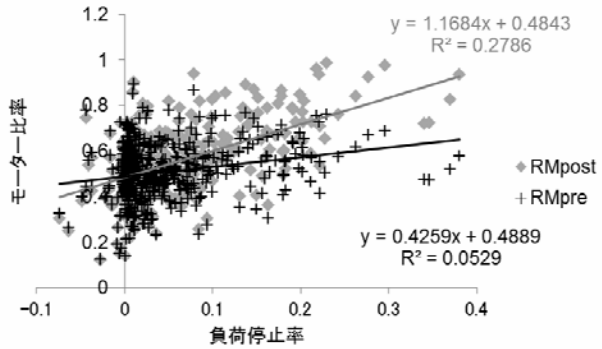


図 2.11　瞬低前モーター比率の推定

現実にわが国の大抵のモーターはモーターブレーカー，あるいはサーマルリレーつきの開放遅延型マグネットスイッチで保護されており，どちらの保護装置とも瞬低で停止しません。設備の現実という面からも，この作業仮説は正しいようです。

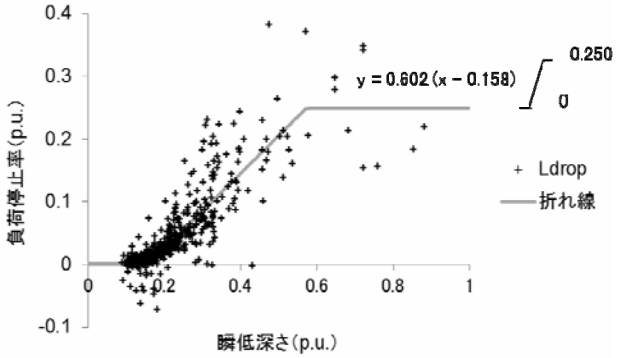


図 2.12　瞬低深さと負荷停止率

なお，瞬低が深いほど負荷停止率は高くなりますが，この関係を図 2.12 に紹介しておきます。深さ 15.8%までは負荷停止は微小です。57.3%より深い瞬低では負荷停止 25.0%で飽和します。こ

の飽和値は 20 世紀の観測では 30%程度だったのですが，それより低くなっています。おそらく瞬低補償装置などによる各種瞬低対策が普及したためでしょう。

これでモーター負荷のパラメータは一応全部求まったわけですが，観測対象の中には一時的に少量の同期発電機を含んでいることがあります。需要家の自家発電などがあります。これは給電運用上把握できませんので，観測された現象を用いて補正する必要があります。

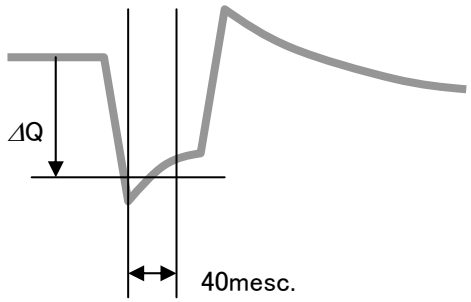


図 2.13 無効電力挙動とΔQ の定義

そこで瞬低中に同期発電機が供給する無効電力に着目します。モーターも瞬低中は誘導発電機に変身するので図 2.2 のような電圧消滅遅れを演じるのですが，その程度は同期発電機より圧倒的に小さなものです。ここでは負荷側からの無効電力突き上げΔQを図2.13のように定義します。

観測したΔQ をシミュレーションで再現した値ΔQ_{sim} と比較します。$\Delta Q - \Delta Q_{sim}$ は瞬低深さΔV（40 ミリ秒連続した最大平均深さ）が深いほど大きいでしょう。よって，瞬低前の有効電力P_0 とΔV で基準化した指標 Iq を次のように定義し，これを「相対無効電力誤差指標」と呼ぶことにします。この指標が大きいことは多量の自家発電機が存在することを意味します。

$$Iq = \frac{\Delta Q - \Delta Q_{sim}}{P_0\, \Delta V}$$

瞬低前モーター比率 Rm とモーター慣性 Mm は瞬低前需要 Ppre にある程度依存するかもしれません。またモーター負荷率 Lm は確実に Ppre に強く依存します。それゆえモーター負荷の 3 個のパラメータ Rm, Mm, Lm は Ppre と Iq の両者によって説明されるのが妥当です。これに使うべき手法は「多重相関」です。Rm*，Mm*，Lm* は多重相関による推定値で，次のように 1 次式で表現されます。

$$Rm^* = A_R\, Ppre + B_R\, Iq + C_R$$
$$Mm^* = A_M\, Ppre + B_M\, Iq + C_M$$
$$Lm^* = A_L\, Ppre + B_L\, Iq + C_L$$

今回のデータでは各係数は次のように算出されました。A_L が大きな負の値になっています。

$$A_R = -0.09281, \quad B_R = -0.00784, \quad C_R = 0.575094$$
$$A_M = -0.05433, \quad B_M = 0.063246, \quad C_M = 0.431154$$
$$A_L = -0.45432, \quad B_L = 0.071733, \quad C_L = 0.967485$$

これらから, Iq = 0, つまり自家発電機とその出力に見合った負荷が除去されたときの, 3 個のパラメータの値 Rm’, Mm’, Lm’ を次のように推定できます。

$$Rm' = Rm - B_R\, Iq$$
$$Mm' = Mm - B_M\, Iq$$
$$Lm' = Lm - B_L\, Iq$$

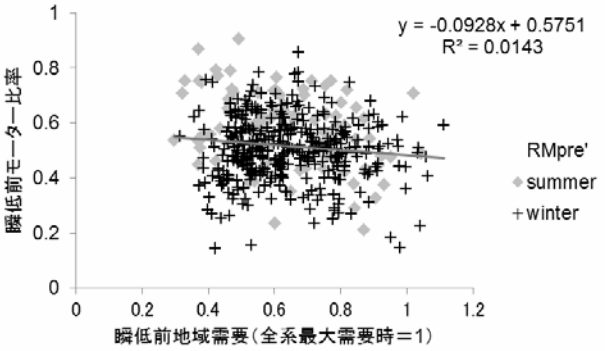


図 2.14　需要と瞬低前モーター比率

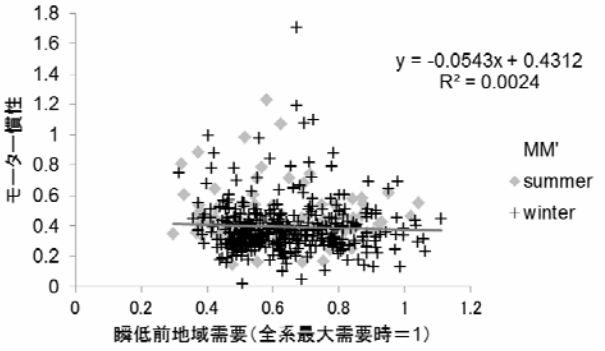


図 2.15　需要とモーター慣性

こうして 1998 から 2010 年度に観測された 467 個の瞬低データからモーター負荷のパラメータを求めた結果が図 2.14 から 2.16 です。瞬低前需要との相関を示しています。瞬低前モーター比率は需要の影響をあまり受けず，50%ほどになっています。慣性も需要の影響をあまり受けず，0.4 秒ほどになっています。負荷率は需要の影響が大きく，ピーク需要時で 50%，ハーフ需要時で 70%ほどになっています。

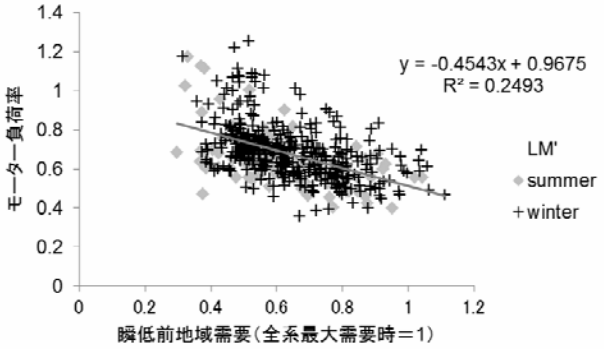


図 2.16　需要とモーター負荷率

この傾向は次のように説明できると思います。低需要期のモーター負荷はインフラストラクチュアに用いられるポンプやファンなどが主体でしょう。これらは制御されるにしてもせいぜいオンオフ制御くらいで，オンの間はモーターを最大出力付近，つまり高負荷率で運転するのが経済的です。高需要期になってくると，それに加えて工業用途のドリルやグラインダなどを駆動するモーターが動きます。これらは常時はほとんど空転状態で，たまに機械的負荷がかかります。従って高需要期にはモーター負荷率が低下します。

なお，横軸の瞬低前地域需要が 1 より大きいデータがあり，この理解に苦しむ人も多々いるらしいので説明しておきます。横軸は全系最大需要時の地域需要を 1 に規格化しております。ところで地域最大需要は全系最大需要時の当該地域需要より大きな値をとることもありえます。電力系統ではこれを，すべての地域で同時に最大需要をとることはないとして，「不等率」というファクターで説明しています。

瞬低前モーター比率，慣性，負荷率の年次変化を図 2.17 に示します。3 者ともゆるやかな低下

傾向を示しています。インバータ駆動型のモーターの普及が一因となっていることは否定できませんが，インバータ駆動の総需要はさほど大きなものではありますまい。それより 2002 年度以前は観測地点数が少なく，かなりの地域のデータが欠落しており，当然データ数も少ないので，得られた結果をそのまま信じることはできません。従って今後も地道な観測を続ける必要があります。

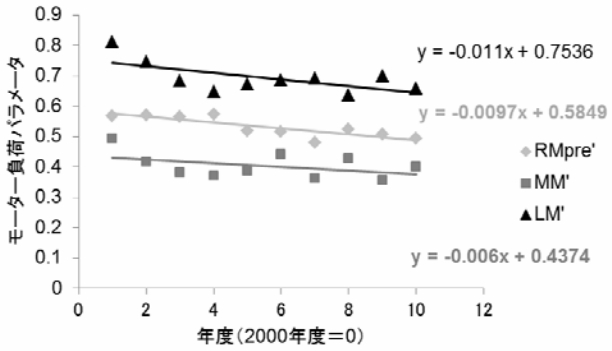


図 2.17　モーター負荷パラメータの年次変化

以上でモーター負荷の残り 3 個のパラメータが同定できました。しかしその確からしさはどうなのでしょうか。散布図を見るとけっこう大きくばらついています。

3 個のパラメータを同定した際には時間累積二乗誤差の期待値を計算しており，これを e_{opt} とします。またこれらの 3 個のパラメータを与えてシミュレーションも行っており，その際の時間累積二乗誤差を e とします。さらに，同定のために 3 個のパラメータを振って 27 回以上のシミュレーションを行っており，それらの時間累積二乗誤差の最小値を e_{min} とします。これら 3 個の誤差の関係は

$$e_{opt} \fallingdotseq e \ < \ e_{min}$$

となるはずです。そこで次の 2 個の指標

$$(e / e_{opt}) - 1 , \quad (e / e_{min}) - 1$$

と瞬低深さの関係をしめしたのが図 2.18 です。

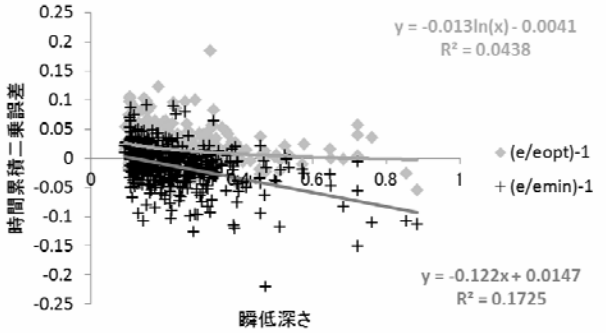


図 2.18　同定誤差と瞬低深さの関係

同定が確かなら $(e / e_{opt}) - 1$ はほぼゼロになるはずです。図では瞬低が十分深い場合にゼロになっています。深い瞬低では観測ノイズの影響が相対的に少なくなるので同定が確かなのだと解

釈できます。

また，同定が確かならば $(e / e_{min}) - 1$　はゼロより少し小さな値をとるはずです。図では平均的に瞬低深さ 10%以上でこの値が負になっています。

以上の結果から同定はそこそこ確からしいことがわかります。散布図にみられるばらつきは，同定誤差によるものもあるでしょうが，日時や地域による特徴も現れているでしょうから，ばらつきが大きいことをとりたてて問題にする必要はないでしょう。

文献

(1) 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.

(2) Xu, Mansour: “Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, Feb. 1994, pp. 479-493.

(3) 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.

(4) 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.

(5) 上田，駒見：「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，126 巻 6 号，2006，pp. 635-641.

(6) 熊野：「多数誘導機群の波及電圧崩壊と機器保護が系統負荷特性に与える影響」，電気学会論文誌 B，128 巻 3 号，2008，pp. 545-550.

(7) Nagoya, Komami: “Parameter Identification on Induction Motor Load using Measured Data”, IEEJ Trans. PE, Vol. 130, No. 7, 2010, pp. 633-639

(8) 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」，電気学会論文誌 B, 132 巻 1 号，pp.71-76，2012

(9) 奥本，餘利野，佐々木，造賀，藤田，山中：「将来断面における太陽光発電の大量導入に伴う信頼度面の諸課題」，電気学会論文誌 B，132 巻 2 号，pp.171-180，2012