

「初学者のための図解でわかる制御工学 II」特集号

応 用 編

電力システム

薄 良彦*

1. はじめに

電力システム（電力系統）とは、電気エネルギーの発生、輸送、配分、消費を行うことを目的としたシステムである。多くの教科書や技術書（たとえば[1-4]）では、火力や水力発電などの集中型発電プラントから変電所や送電線を介して負荷に電気エネルギーが送られるという地理的に大規模な電力システムがおもな対象になっている。最近ではマイクログリッドやスマートグリッドと称される新しい技術展開から、住宅内や地域などの小・中規模の電力システムも研究対象になっている。本解説では、筆者の限られた知識および紙面の制約の中で、電力システムとその制御の基礎を述べる¹。

2. 色々な電力

電力システムの教科書を開いてみると、電力に関する多くの術語—瞬時電力、有効電力、無効電力、皮相電力、複素電力—が登場する。そこで、本解説では最初に電力に関する術語を整理する[5]。簡単のため、正弦波電圧源

$$v(t) = \sqrt{2}V \sin \omega t, \quad t \geq 0 \quad (1)$$

から負荷に電力を供給する単相回路を考え、定常状態において負荷電流が

$$i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi), \quad t \geq 0 \quad (2)$$

であるとする。なお、 V (I) は電源電圧（負荷電流）の実効値²、 ω は電源の角周波数、 φ は電圧と電流の位相差である。時刻 t における瞬時電力 $p(t)$ とは電圧および電流の積 $v(t)i(t)$ であり、正弦波定常状態において計算すると

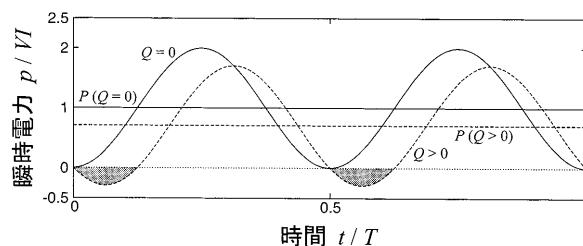
$$\begin{aligned} p(t) &= \sqrt{2}V \sin \omega t \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \\ &= VI \{ \cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi) \} \\ &= VI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - VI \sin \varphi \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (3)$$

* 京都大学 大学院

Key Words: electric power systems, dynamics, stability.

¹ 電気エネルギーの輸送および配分に関わる制御に解説を限定し、発生に関わる電力プラントの制御は扱わない。

² 実効値 V は $v(t)$ の自乗平均値 $\sqrt{\int_0^T \{v(t)\}^2 dt / T}$ を意味する。抵抗 R に $v(t)$ を加えた場合の平均電力 P は V^2/R となるので、交流を消費電力の同等な直流と見なせる。



第1図 瞬時電力の波形。正弦波定常状態において瞬時電力 $p(t)$ は電源周期 T の半分で振動している。 $p(t)$ の時間平均が有効電力 P である。 $p(t)$ の向き（正負）が無効電力 Q により特徴付けられ、 $Q > 0$ では負荷から電源へ $p(t)$ が戻る ($p(t) < 0$) 期間が存在する。

となる。(3) 式の右辺第1項は $p(t)$ の時間平均 P に関係しており、実際に P を計算すると

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = VI \cos \varphi, \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4)$$

となる。この $P = VI \cos \varphi$ は有効電力とよばれ、負荷で消費される正味の電力に相当する。一方、(3) 式の右辺第2項は時間平均に寄与しない項であり、その係数

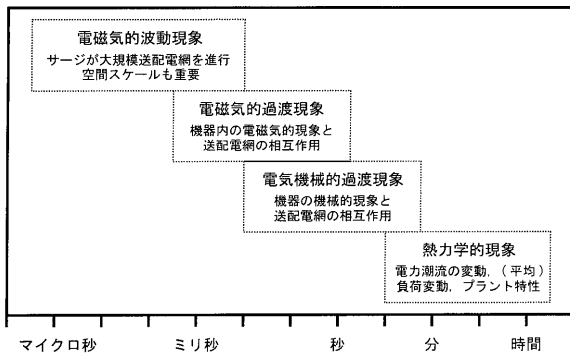
$$Q = VI \sin \varphi \quad (5)$$

は無効電力とよばれる。この第2項は瞬時電力 $p(t)$ の時間変化、とくに電源と負荷の間を往復するエネルギーに関係する。 Q の正負は位相差 φ により変わり、負荷が誘導性の場合に $Q > 0$ 、容量性の場合に $Q < 0$ となる（第1図）。また、(3) 式に現れる電源電圧および負荷電流の実効値の積 VI は皮相電力とよばれる。さらに、複素電力 $\tilde{S}$ が P および Q を用いて

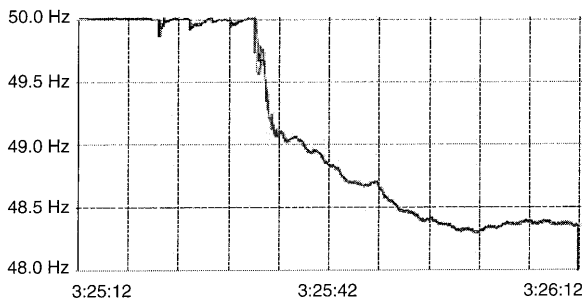
$$\tilde{S} = P + jQ, \quad j \text{ は虚数単位} \quad (6)$$

と定義される。この定義より、電源電圧のフェーザ表示³を $\tilde{V} = V$ 、負荷電流のフェーザ表示を $\tilde{I} = I e^{-j\varphi}$ とすると、 $\tilde{S} = \tilde{V} \tilde{I}^*$ と書けるため ($\tilde{I}^*$ は $\tilde{I}$ の複素共役)、複素電力はフェーザ表示による回路計算で有効電力や無効電力を求める際に便利である。

³ (1) 式で与えられる電源電圧のフェーザ表示とは、 $v(t) = (\sqrt{2}\tilde{V}e^{j\omega t} - \sqrt{2}\tilde{V}^*e^{-j\omega t})/(2j)$ と複素数表示した場合の係数 $\tilde{V}$ で（交流）電圧 $v(t)$ を表現する方法である。



第 2 図 電力システムに生起する物理現象とその時間スケール [3]。いずれの時間領域を制御の対象にするのか把握することが第一に重要である。

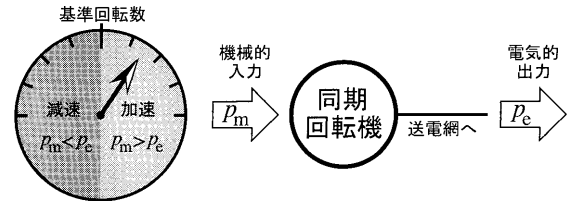


第 3 図 広域大停電に至る電力システムのダイナミクス [6]。2003 年 9 月 28 日にイタリア内の複数の変電所で実測されたデータであり、周波数が規定値である 50 Hz から漸次低下していく様子を示している。©2004, IEEE

3. ダイナミクスと安定性

つぎに、電力システムに生起する物理現象（ダイナミクス）について整理する。第 2 図に横軸の時間スケールに対して生起する物理現象を示す [3]。マイクロ秒からミリ秒オーダではサージとよばれる電磁気的波動現象が支配的であり、波動が大規模送配電ネットワークを進行していくため、この現象では空間スケールの考慮も必要である。ミリ秒から秒オーダでは電磁気的あるいは電気回路に関わる過渡現象が現れる。この現象には機器を構成する電気回路と送配電ネットワークとの相互作用によるものも含まれ、秒オーダ付近では発電機などを構成する機械系とネットワークとの相互作用が過渡現象として現れる。分から時間 (hour) オーダになると、ネットワークにおけるエネルギーフロー（電力潮流）の変動、負荷消費の変動に対する発電機出力の調整とそれに関わる発電プラント内部の現象などが対象となる。

続いて、ダイナミクスと密接に関わる安定性について交流電力システムを対象に説明する。電力システムはシステム内外からの擾乱を常に受けている。外部からは、鉄塔への落雷や送電線と樹木との接触、自然災害に伴う架線の切断などが、内部からは、負荷の変動や遮断、発電プラントや開閉器などの機器の故障などがあげられる。このような擾乱から大規模停電につながる危険性もあり



第 4 図 発電機（同期回転機）の回転数と周波数・発電力制御。発電機の入出力（電力）のバランスにより発電機の回転数、電力システムの周波数は変動する。このバランス調整が周波数・発電力制御とよばれる。

(第 3 図を参照)、物理的な意味でシステムの安定性¹を確保することは重要となる。電力システムの安定性についてはさまざまな概念や定義がある（詳細は [1-3]）。大まかにいえば、システムの長期間における同期運転の維持に関わる定態安定性、急激な擾乱などに起因する短時間の同期運転維持に関わる過渡安定性、交流電圧の振幅維持に関わる電圧安定性などがあげられる。これらを動的システム論の観点から見ると、ダイナミクスのモデルである動的システムの平衡点の存在や消滅（定態安定性の対象）、制御工学で用いられる意味での安定性 [7] の喪失と線形の動特性（定態や電圧安定性）、平衡点の引き込み領域に関わる非線形の動特性（過渡安定性）に分けられる。これらの安定性を電力システムで確保するために次節で見ていく制御が必要となる。

4. 制御

本節では、前節までの準備のもとで、本特集号の目的である制御—周波数制御および電圧制御—について説明する。

4.1 周波数制御

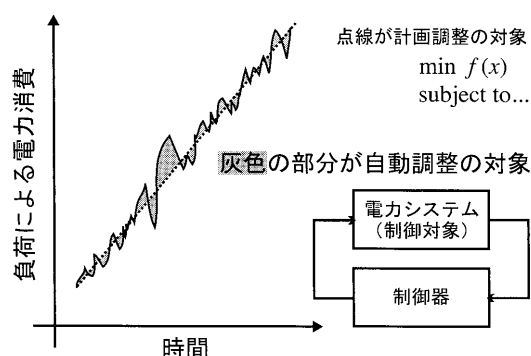
周波数制御は、システム内の周波数²を規定値を含む適正範囲内³に収めることを目的とし、定態安定性や過渡安定性の確保に関わっている。発電機への機械的入力が電氣的出力を上回ると該当の発電機は加速し、下回ると減速する（第 4 図）。よって、発電機の回転数、すなわちシステム内の周波数を維持するためには、システム内の電源が供給する電力と負荷を含めてシステム内で消費される電力のバランスを取る必要がある。このように電力の正味の消費に関わることから有効電力の調整が重要で、文献 [1] では周波数・発電力制御とよばれている。

周波数制御の基本は電源または負荷を調整することである。従来の電力システムの運用では、おもに電源の出力電力を負荷の消費電力に見合うよう調整することで、

¹安定性の度合いの意味で安定度という術語も広く用いられる [1,2]。

²欧州では 50 Hz、北米では 60 Hz、日本では二つの周波数が混在している（東日本は 50 Hz、西日本は 60 Hz）。

³発電機の安全性などを考慮し 50Hz, 60Hz $\pm$ 0.2Hz $\sim$ 0.3Hz 程度が選ばれている。



第5図 負荷による電力消費の時間変動と周波数・発電力制御。粗い時間 (hour) オーダの消費変動に対しては計画的にバランスが調整され、それより細かい分 (minute) オーダの消費変動に対しては、変動を検出し自動的にバランスが調整される。

システム内の有効電力バランスを維持し、周波数を規定値に収めるように努めている。負荷による電力消費は時々刻々と変動し、システム内の周波数や有効電力も変動することになる。粗い時間 (hour) オーダの負荷変動に対しては発電機の起動や停止などにより計画的に (すなわち、準静的に) バランスが調整される。それより細かい分 (minute) オーダの負荷消費の変動は詳細な予測が容易ではなく、負荷消費の変動を検出しバランスを調整する動的なメカニズム (自動制御) がシステムに必要となる (第5図)。これには周波数制御発電所が多くの役割を担い、発電プラントの調速機によるガバナフリー運転 [2,4] や出力調整による負荷周波数制御 (LFC¹) [2,4] などがある。

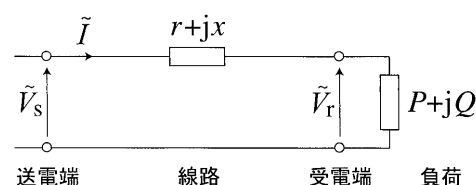
4.2 電圧制御

電圧制御は、システム内の電圧を規定値を含む適正範囲内²に収めることを目的とし、電圧安定性の確保に関わっている。先ほどの周波数制御は有効電力の調整が重要であった。一方、電圧制御ではシステム内の無効電力の調整が重要とされる。ここで、無効電力自体が直感が働きにくい概念であるので、上記の理解を容易にするために、第6図のように電圧一定の送電端 $\tilde{V}_s = V_s$ から線路 (抵抗 r , リアクタンス x) を介して受電端 $\tilde{V}_r = V_r e^{-j\theta}$ に電力を送ることを考える (θ は電圧位相の差で相角度とよばれる) [8]。また、受電端には定負荷 (有効電力 P および無効電力 Q) が接続されているものとする。いま、受電端電圧 V_r への負荷電力 P および Q の影響を調べる。まず、2. で述べた複素電力を用いて P および Q を計算する。線路の電流を $\tilde{I}$ とすると $P + jQ = \tilde{V}_r \tilde{I}^*$ であるから、実部および虚部を比べることで

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{r(V_s V_r \cos \theta - V_r^2) + x V_s V_r \sin \theta}{z^2} \\ Q &= \frac{x(V_s V_r \cos \theta - V_r^2) - r V_s V_r \sin \theta}{z^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

¹Load Frequency Control

²実効値で $101\text{V} \pm 6\text{V}$ や $202\text{V} \pm 20\text{V}$ など。



第6図 簡易送電モデルと電圧・無効電力制御。(8)式より、ある条件のもとにおいて負荷が接続された受電端電圧 (の大きさ) V_r の変動はおもに負荷の無効電力 Q に起因し、電圧制御と無効電力の調整が関係付けられる。

を得る ($z = \sqrt{r^2 + x^2}$)。つぎに、 P および Q が微小変動した場合の受電端電圧 V_r の変動の比 $(\partial V_r / \partial P) / (\partial V_r / \partial Q)$ を計算する。(7)式から θ に関わる項を消去し、陰関数の定理を適用するなど、少し頑張ると

$$\frac{\partial V_r / \partial P}{\partial V_r / \partial Q} = \frac{zP / (V_r^2 / z) + r}{zQ / (V_r^2 / z) + x} \quad (8)$$

が得られる。負荷の P および Q が V_r^2 / z (受電端から見た短絡容量とよばれる) より十分小さくかつ線路の抵抗 r がリアクタンス x に比べて十分小さい場合には、(8)式の右辺は1より十分小さくなる³。上記の条件を満たす場合には、電圧の変動はおもに無効電力に着目して考えればよいことになる。一方、上記の条件を満たさない場合は有効電力の変化が電圧変動を及ぼすことになるが、この場合も無効電力の調整により電圧を適正範囲内に維持することが期待される⁴。以上より、電圧制御は文献[1,2]において電圧・無効電力制御とよばれている。

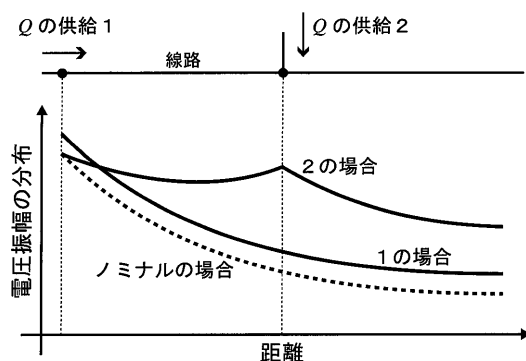
つぎに、電圧制御のために無効電力をどのように調整するのか見ていく。上記では受電端の電圧 V_r と負荷の P および Q との関係を調べた。この結果から、電圧制御の一つの指針として「制御を必要とするシステム内の箇所で無効電力の調整を局所的に行う」ことが考えられる (第7図)⁵。実際、無効電力の供給は送電損失につながるため、送電効率の向上のため局所的な制御が望ましい。これを踏まえた制御方法として、発電プラントの電圧調整、調相設備⁶の開閉、変圧器タップ (変圧比) の調整などが行われる。また、パワーエレクトロニクス機器を活用した調相設備 [3] も検討されている。上記の方法が制御を要する箇所の近くに導入され、時間スケールの長い

³文献[4]によると、 x/r は 500 kV 架空線で 31, 6.6 kV 架空線で 1.8 である。

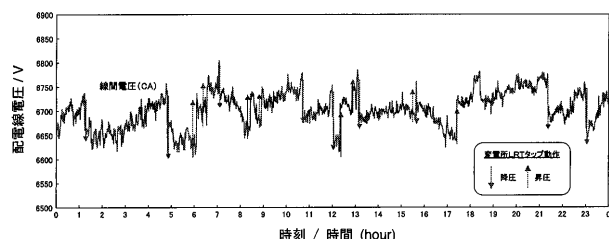
⁴関連した技術課題として、太陽光発電が大量導入された配電システムの電圧制御がある (たとえば文献[9])。

⁵“VARs do not travel well.”—G.C. Loehr (VAR は無効電力の単位として用いられ、物理量としての実体はワット [W] と同じである。)

⁶無効電力の発生、消費により力率を改善し電圧を維持するための設備を意味する。2. で見たように誘導性・容量性負荷が無効電力の発生に関わり、大容量用リアクタンスやコンデンサが調整設備として用いられる。



第7図 無効電力 Q と電圧振幅分布との関係。理想的な1例をかなりラフに描いたものであり、ノミナルの場合として電圧が距離方向に漸次低下しているとする。変圧器などを介して Q を供給した場合1、コンデンサなどから Q を供給した場合2において、 Q の調整により電圧分布が変化している。とくに、2の場合は調整位置を中心に分布が変化している様子が見えている。



第8図 6600 V 配電システムにおける電圧制御の実例。配電用変電所の負荷時電圧調整変圧器の送り出し電圧の時系列を示しており、配電システム全体の電圧が適正な範囲内に維持されるように、送り出し電圧が調整される様子が見えている。関西電力（株）提供。

電圧変動では計画的に無効電力が調整される。一方、時間スケールの短い電圧変動に対しては、電圧や電流の変動を検出し無効電力を調整する動的なメカニズム（自動制御）がシステムに必要となる。

実例として、第8図に配電用変電所から高圧（6600 V）配電システムへ送り出されている電圧の時系列データを示す。これは負荷時電圧調整変圧器（LRT¹）[2,4]による電圧制御の例である。LRTでは、変圧器を通過する電流の変動に応じて配電線路による電圧降下値を算出し、配電システム始端から終端まで全体の電圧を $6600\text{V} \pm 250\text{V}$ の範囲に収まるように、配電システム始端に相当する変圧器の巻線タップを操作し変圧比を（離散的に）切り替えている。電流の変動を検出することで変電所のLRTが動作し、電圧の過大な上昇や降下を抑制し適正な値に維持されている。

5. おわりに

本解説では、電力システムとその制御の基礎を説明した。内容はいずれも多くの教科書に掲載されており決し

て新規のものではない。本解説では、物理現象（ダイナミクス）および制御の必要性の観点から基礎的な内容を述べ、教科書・技術書や論文を読むための橋渡しを意図したつもりである。紙数の制約から割愛した緊急時制御や本解説に登場した専門的な術語に関する丁寧な記述は本解説で参考にした教科書[1-3]や技術書[4]、システム制御の観点からの電力システムの研究動向は最近の特集号[10,11]などを参照されたい。

最後になりましたが、本解説の原稿をご検討頂きました各位、実測データをご提供頂きました石原一志様ならびに関西電力株式会社、有益なご指摘を頂きました査読者各位に厚く御礼申し上げます。

(2012年2月9日受付)

参考文献

- [1] 芹澤：電力システム工学，丸善（1996）
- [2] 大澤編著：電力システム工学，オーム社（2001）
- [3] J. Machowski, J. W. Bialek and J. R. Bumby: *Power System Dynamics and Stability*, second ed., John Wiley & Sons (2008)
- [4] 野田編：電力システムの制御，電気書院（1986）
- [5] 深尾：有効電力と無効電力；電気学会誌，Vol. 101, No. 10, pp. 965-969 (1981)
- [6] S. Corsi and C. Sabelli: General blackout in Italy Sunday September 28, 2003, h. 03:28:00; *Proc. IEEE PES General Meeting*, pp. 1691-1702 (2004)
- [7] 永原：状態空間表現と安定性；システム/制御/情報，Vol. 56, No. 4, pp. 176-179 (2012)
- [8] 上之園：現代電力工学，オーム社（1980）
- [9] 辻：配電システムの電圧制御におけるリアルタイムプライシングの展望；計測と制御，Vol. 51, No. 1 pp. 31-36 (2012)
- [10] 特集・エネルギーシステムの新展開—ICTによる消費情報の収集と利用；システム/制御/情報，Vol. 55, No. 6, pp. 215-258 (2011)
- [11] 特集・グリーンイノベーションと制御理論；計測と制御，Vol. 51, No. 1, pp. 8-86 (2012)

著者略歴

すすき
薄

よし ひこ
良 彦（正会員）



2005年3月京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年4月同大学院助手，2007年4月同助教，2011年10月同講師となり現在に至る。2008年4月より2年間、米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校客員研究員。非線形力学系の解析および制御に関する研究とその電力ネットワークのデザインへの応用に従事。2009年度システム制御情報学会学会賞論文賞などを受賞。計測自動制御学会，電子情報通信学会，電気学会，IEEE，SIAMなどの会員。

¹Load-Ratio control Transformer