

電力系統安定化システムの技術動向

Development of Stabilizing Control Systems for Preventing Expansion of Loss of Synchronism

佐藤 正弘
M. Sato

広川 正
T. Hirokawa

津久井 良一
R. Tsukui

電力系統は、電力需要の増加とともに拡大・複雑化しつつある。一方、電力は現代社会の活動を維持するエネルギーの基盤であり、良質の電力を停電することなく供給することが求められている。電力系統には落雷などによる系統事故が発生し、最悪の場合、発電機が次々と停止し広範囲に停電する可能性がある。この事故の防止のために、先端技術を駆使した安定化対策が施されてきた。

ここでは、まず過去の大規模停電事故の例、電力系統に発生する異常現象と、開発してきた系統安定化方式を紹介する。また、最近開発した系統安定化システムの機能とそれを実現するに至った背景、さらに、将来の電力系統の発展に伴い、系統安定化システムに期待される機能の概要と効果を述べる。

The size and complexity of electric power systems has been increasing as a result of the construction of new generators, substations, and lines to meet the steady growth in load demand. Electricity is an essential form of energy that supports society, and utilities are required to ensure high-quality electricity supplies without interruption. However, faults such as lightning may cause loss of synchronism among generators, leading to a blackout. In order to prevent such an expansion of loss of synchronism, many systems based on the latest technologies have been developed and applied.

This paper outlines various types of disturbances that occur in electric power systems, and describes approaches and systems for preventing blackouts. In addition, a description is given of new functions that will be required in the near future in order to maintain the stability of electric power networks.

まえがき

電力系統は、多数の発電所、変電所、負荷が送電線で接続された大規模なシステムであり、電力需要が増加するにつれて発電機や変電所が逐次増設され拡大してきた。一方、電力は現代社会の活動を支えるエネルギーの基盤であり、良質の電力を停電することなく供給することが強く求められている。そのため、落雷などによる系統事故が原因で多数の発電機が運転を停止し、供給支障が生じないようにさまざまな系統安定化システムが開発・適用されてきた。さらに近年、電力会社間の広域連系が進められつつあり、事故発生後の動搖現象は複雑化するとともに、その影響が広範囲に波及しやすい状態となるために、安定化対策がますます重要になっている。

また、系統安定化システムを設置すれば送電可能な最大電力を増加できる場合があり、設備の利用効率を高め、発電コストを減少させる経済運用にも寄与することが期待できる。

2 大規模停電事故と安定化対策

定常時の電力系統においては、負荷量と発電量が一致して、

すべての発電機が同じ速度で回転する同期運転の状態にある。しかし、万一厳しい系統事故が発生すると、おののの発電機の回転速度がアンバランスになり、発電機の一部が同期運転できない脱調現象になり、さらにその影響で他の発電機の脱調を引き起こし、大規模停電事故に至ることが懸念される。

表1には、海外における大規模な停電事故の例を示す。発生原因は、落雷、機器故障などさまざまであるが、多数の発電機が脱調したり、系統が分断されるなど多様な形に進展し大規模な停電に至っている。

このような大規模停電事故を防止する目的で、さまざまな安定化対策が採られてきた。特に、わが国の電力系統は大容

表1. 海外の大規模停電事故の例

Large-scale blackouts in various countries

| 発生年月日 | 発生場所 | 停電規模 |
|------------|-----------|-----------|
| 1965-11- 9 | 米国北東部 | 4,360万 kW |
| 1977- 7-13 | ニューヨーク | 609万 kW |
| 1977- 9-20 | カナダ ケベック州 | 1,000万 kW |
| 1978-12-19 | フランス | 2,900万 kW |
| 1982-12-14 | カナダ ケベック州 | 1,320万 kW |
| 1983-12-27 | スウェーデン南部 | 1,100万 kW |

量の電源、負荷が集中している構造であり、基幹系統が大容量の電力を送電しており、厳しい事故の際はその影響が広範囲に波及しやすい性質がある。このため、わが国では、電力系統の供給信頼度を維持することを目的に、早くから事故波及を防止する系統安定化システムの開発と適用が進められてきた。

表2に、開発されたいいくつかの代表的な系統安定化システムを示す。

表2. 系統安定化システムの開発

Stabilizing control systems developed for preventing expansion of loss of synchronism

| 適用年 | システム名 |
|-------|-------------------------------|
| 1960代 | 系統分離時需給バランス制御(SSC) |
| 1970代 | 過渡安定度維持・事前演算形安定化システム |
| 1984 | 過渡安定度維持・リアルタイム動揺予測形安定化システム |
| 1984 | 重負荷ケーブル系統安定化システム |
| 1989 | 動態安定度維持・リアルタイム動揺予測形安定化システム |
| 1995 | オンラインシミュレーション過渡安定度維持システム(TSC) |
| 1995 | 過渡・動態安定度維持・リアルタイム動揺予測形安定化システム |

電力系統では、その運用状態や事故の発生場所などによってさまざまな異常現象を呈しながら進展し、供給支障に至る可能性がある。事故によって引き起こされた系統の動揺を放置すると、多数の発電機が脱調して周波数の大幅な低下を引き起こす。そのため、さらに他の発電機が脱調する可能性がある。また、発電機群の振動のため、位相角差が拡大して、系統の電圧が大きく低下し、一部の負荷が脱落する可能性も考えられる。このために、系統現象が複雑な様相を呈する前に、動揺の原因となる最初の事故の発生直後に適切な対策を施し、異常現象の進展をくい止めることができると有効である。また、比較的ゆっくりした進展を示す場合にも、できるだけ早めに異常現象を把握して安定化対策を講じることが必要である。

表3には、異常現象の主な発生原因と異常状態の様相、そして異常状態に至るまでのおおよその時間を()内に示す。電力系統が出現して以来、これらの異常現象に対してさまざまな安定化対策が施されてきた。例えば、発電機の励磁系、調速機系を制御し安定化を図る方法などもあるが、ここでは、放置すれば発電機が次々と脱調するような厳しい現象を対象にして、この影響を最小限に止めるために発電機遮断などの緊急制御を実施する事故波及防止対策について述べる。異常状態に進展するまでの時間が短く高速な処理が必要な過渡安定度、動態安定度、周波数異常、電圧安定度問題を取り上げて、その解決のために開発してきた系統安定化システムに関する最近の動向を述べる。

表3. 電力系統の異常現象

Unstable phenomena in power systems

| 異常現象 | 発生原因 | 異常の様相 |
|-------|-----------------|---------------------------------|
| 過渡安定度 | 落雷など系統事故 | ・発電機の脱調 (1～数秒) |
| 動態安定度 | 同上 重負荷 | ・発電機群の動搖 ・発電機の脱調 (数秒～数十秒) |
| 周波数異常 | 系統分離 電源脱落 | ・発電機脱落 ・負荷脱落 (数秒～数十秒) |
| 電圧安定度 | 重負荷 調相容量不足 | ・負荷の脱落 (数十秒～数十分) |
| 過負荷 | 系統事故後の健全系統の電力増加 | ・機器の損傷 (数十秒～数十分) |

3 系統安定化システムの技術的変遷

次に、電力系統の異常現象とそれに対する最近の系統安定化システムを表4に示し、それらの開発に至った背景および技術的な進展を述べる。

表4. 安定度問題と最近の系統安定化システム

Stability problems and recently developed stabilizing control systems

| 安定度問題 | 系統安定化システム |
|-------|---------------------------------------|
| 過渡安定度 | リアルタイム動揺予測形システム オンラインシミュレーション形システム |
| 動態安定度 | リアルタイム動揺予測形システム |
| 周波数異常 | 需給バランス・周波数維持システム |
| 電圧安定度 | リアルタイム電圧安定性監視システム |

3.1 過渡安定度対策

過渡安定度対策には、従来から事故を高速に除去することが第一に考えられてきた。しかし、保護リレーおよび遮断器による事故除去時間の短縮には限界があり、的確に除去が行われても、系統の状態、事故の条件によっては発電機の脱調を防止することが困難な場合がある。一方、近年、大容量の電源が遠方に建設され、長距離送電線によって大容量の電力が送電されるようになると、事故により電源の発電機群が大きく加速され一群となって脱調する問題が明らかになってきた。事故発生直後、発電機出力が急激に減少し、発電機が加速されるが、その度合いが大きいほど脱調しやすくなるためである。

この現象を安定化するためには、加速する発電機の一部を高速に遮断することが有効である。このため、事前演算形安定度維持システムが1970年代に開発された。これは、代表的な事故の種類と発生場所、事故発生直前の発電機出力の大きさなどで系統状態を分け、状態ごとに遮断すべき発電機台数をあらかじめ決めておき、運用中に事故が発生すると、系統

状態に応じて決められた発電機台数を遮断する方式である。

その後、高速なCPUが出現するとともに高速データ伝送網の適用が進んだ結果、電力系統の広範囲の場所から収集したデータを用いて計算量の多い複雑なアルゴリズムを演算することが可能になった。また、事故の発生場所、事故継続時間などは多様であるために、さまざまな事故に対して柔軟に対処できる方式が必要となり、1980年代、リアルタイム動揺予測形安定化システムが開発された。

これは、事故の影響、安定度の厳しさを発電機の動揺現象そのものから正確に把握する方式に基づいている。事故発生後、発電機出力など諸電気量をリアルタイムに測定し、対象の発電機と他の発電機群との相対的な動揺の関係を推定して、約250ms程度で、脱調予測、安定化のための遮断台数を決定、実施するものである。1984年以降、この原理に基づくシステムが多数導入されており、1992年5月、厳しい事故が発生した際、同形の系統安定化システムは的確に応動し事故波及を防止した例も報告されている⁽¹⁾。

さらに、最近の並列計算機技術の進歩や、系統全域のデータを収集できる通信網の設備化、あるいは状態推定手法の充実などが背景になって、オンラインシミュレーション形の基幹系統安定度維持システム(TSC)が開発され、1995年6月から運用に入った⁽²⁾。これは、系統運用中に時間経過とともに、発電機の出力、負荷の分布、あるいは系統構成が変化するにつれて、厳しい事故ケースが変わるため、周期的に安定度をチェックしようとするものである。系統状態をオンラインで把握して、その状態においてチェックすべき厳しい想定事故を自動的に選択し過渡安定度計算を実施して、安定度を判定し、不安定なケースについては安定化のために必要な発電機の最少遮断台数を選択する方式である。

この方式は、系統全体の状況をリアルタイムで正確に把握したうえで、安定度を判定でき、必要な安定化対策を用意できる長所がある。さらに、安定度面からみた系統の特性を常時オンラインで観測できる点も長所である。

3.2 動態安定度対策

動態安定度は、発電機の動揺が数秒～数十秒に及ぶもので、従来では大容量電力の流れる送電線上の有効電力を測定してその振幅が増加することを検出する方法が実用化されてきた。

また、理論的には、発電機群の動揺を表す状態方程式を用い、固有値を計算し判定する方法も広く研究されている。しかし、実規模系統を対象にすると計算時間が長いために、リアルタイム安定度対策のために実用化できるレベルに至っていない。動揺を把握するのに安定度計算プログラムを用いる方法もあるがやはり計算時間が長いためにリアルタイムの安定度対策に活用できるレベルにはない。このように、動態安定度の判定を、計算に基づく手法を用いて行うことは、現在のところではまだ実用化が困難な状況である。

現在実用化され始めた手法は、電力系統において振動現象

を直接観測して発散現象を予測する方法である。その一つは、複数の変電所においてリアルタイムに電圧の位相角を測定し、変電所間の相対的な位相角の変化を正弦波として模擬し、発散傾向であるか否かを予測して脱調を判定する方式に基づくものであり、1990年から運用されている⁽⁴⁾。さらに、1秒程度で脱調する過渡安定度から数秒間振動する動態安定度を対象として安定化を図るシステムが、1995年に運用を開始した。

3.3 周波数異常対策

事故などによって、系統が分離された場合に発生する発電機出力と負荷のアンバランス分を、発電機と負荷を高速に制御することによって、周波数の異常な上昇、あるいは低下を防ぎ、電力系統の崩壊を防止するシステムは比較的長い歴史をもち、1960年代から設備化されている。その後、このシステムは、電圧低下に伴う負荷脱落量を推定する機能を追加することによって、精度向上が図られた。さらに、最近では、電力系統の送電線がループ状に接続されたループ系統が構成されるようになって、系統が分断された後の系統の構成を把握することが難しくなるが、これをリアルタイムに検出する機能も開発されている。

3.4 電圧安定度対策

系統の構成と運用状態によっては、負荷の電力が増加するにつれて電力系統の電圧は低下して限界を超えると電圧崩壊現象が発生する可能性がある。これに対して、電力Pと電圧VのPVカーブで表される関係をリアルタイムで求めながら安定度の監視、運転可能な余裕量を把握する監視システムが開発され、1990年以来運用されている⁽³⁾。

以上、個々の異常現象ごとに開発されたシステムを述べたが、一つのシステムで過渡安定度対策と過負荷対策の機能をもつなど複数の異常現象の安定化を図るものも開発されている。

4 これからの電力系統と系統安定化システム

電力系統は、需要の増加に伴い電源、送電線が増設され、また各種の新しい機器が付加されて、大規模化・複雑化してきた。そして、安定度面では電源や負荷の配置、事故の発生場所などに依存して、脱調する発電機が決まるという特徴をもつため、その特徴を利用した安定化方式や系統安定化システムが開発されてきた。

図1に示すように、今後、需要の増加に伴って、電源が負荷地域から遠方に建設される傾向がさらに強まり、また電力会社間の広域連系がますます強化されるとともに各種の分散電源が新たに導入され、電力会社以外の事業者が発電事業に参入するなど、今までとは異なる系統状況が出現することも予想される。このため、系統構成や系統運用の状態がより変化しやすくなり、新しい異常現象や脱調現象などが出現しやすくなることが懸念される。このようなことを背景として、

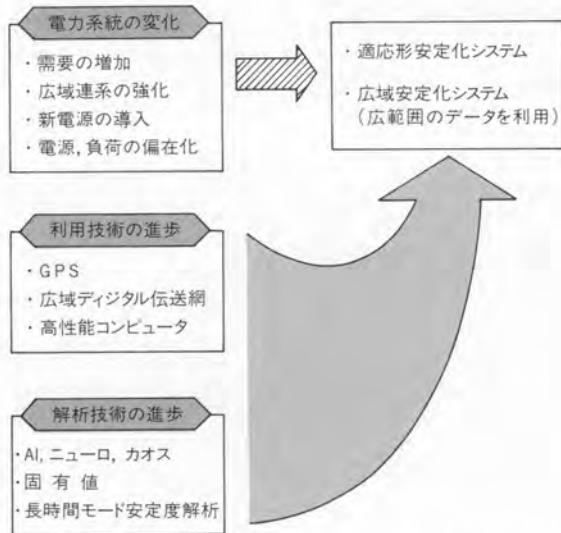


図1. 将来の電力系統と系統安定化システムへのニーズ 系統の変化に対処しやすい適応形安定化システムが必要になる。

Perspective of future needs for stabilizing control systems

系統の運用や構成の変化に対処しやすいような適応形安定化システムの開発が必要になると思われる。

また、広域連系が進めば系統事故の影響が自社系統内にとどまらず、他社の電力系統にも波及しやすくなるので、連系する他の電力系統の情報を収集して、安定化対策を実施する必要性が高まるものと思われる。

一方、今後はGPS (Global Positioning System) や広域高精度デジタル伝送網などの新しい通信システムが利用しやすい環境となる。また、人工知能 (AI)、ニューロ、カオスなどの新技術の研究も活発である。そこで、系統全域において測定した多様なリアルタイムデータを用い、同時に新技術を活用して、より演算処理能力の優れた計算機を用いることによって、さらに高度な判定機能をもった系統安定化方式の開発が可能になるものと思われる。

5 あとがき

以上述べたように、電力系統には事故により多様な異常現

象が発生する可能性があるので、停電事故に進展することを防止するために、その時代の最先端の技術を駆使したさまざまな事故波及防止対策が施されてきた。これからも、電力需要の増加、系統連系の強化、電源の多様化に伴い変化・拡大する電力系統において、電力の安定供給を維持するために先端技術を利用した最適な系統安定化システムの開発が必要である。

そして、これら系統安定化システムを設置することにより、安定度面から今後ますます厳しくなる系統運用制約が軽減され、電力設備を効率よく運用することが可能となり、経済面でも貢献することが期待できる。

文 献

- (1) Y. Ooura, et al: Stabilizing Control System Preventing Loss of Synchronism from Extension and Its Actual Operating Experience, 95 WM 188-3 PWRD (1995)
- (2) 太田宏次, 他: オンライン安定度計算による脱調未然防止システム (TSC) の開発, 電気学会論文誌 B, 115, 1, pp.75-84 (1995)
- (3) M. Suzuki, et al: Newly Developed Voltage Security Monitoring System, Trans. on PS, 7, 3 (1992)
- (4) Y. Ohura, et al: A PREDICTIVE OUT-OF-STEP PROTECTION SYSTEM BASED ON OBSERVATION OF THE PHASE DIFFERENCE BETWEEN SUBSTATIONS, 90WM125-5 PWRD (1990)

佐藤 正弘 Masahiro Sato, D.Eng.



1968年入社。系統安定化方式の研究に従事。現在、重電技術研究所システム技術部主幹、工博。
Heavy Apparatus Engineering Lab.

広川 正 Tadashi Hirokawa



1968年入社。電力系統の計算機制御技術の開発に従事。現在、電力事業部電力系統技術部部長。
Power Systems Div.

津久井 良一 Ryoichi Tsukui



1971年入社。電力系統の保護制御、安定化技術の開発に従事。現在、電力事業部電力系統技術部主幹。
Power Systems Div.