

再エネ電源の大量導入に貢献する 電力系統安定化システム

Special Protection System Allowing Mass Introduction of Renewable Energy Systems to Power Grids

星野 友祐 HOSHINO Tomohiro 犬塚 直也 INUZUKA Naoya

カーボンニュートラルの達成に向けて再生可能エネルギー電源（以下、再エネ電源と略記）の主力電源化が検討されているが、再エネ電源が大量導入されると慣性力や同期化力を持つ火力発電などの同期発電機が減少し、系統安定性が低下する問題が生じる。

東芝エネルギーシステムズ（株）は、系統事故発生時に電源制限や負荷制限を行って系統安定性を維持する電力系統安定化システムにおいて、難易度が高まっている平常時の電圧安定性維持にAI技術を活用して適切な電圧制御を実現するシステムや、レジリエンス強化として基幹送電線4回線同時事故（N-4事故）時の同期安定性維持、再エネ電源が解列するリスクに対する周波数安定性維持への対応が可能なシステムを開発した。電力系統安定化システムの導入は平常時の送電可能容量の増大にも寄与することから、再エネ電源の大量導入にも貢献している。

Expectations have traditionally been focused on transforming renewable energy into the predominant source of power to achieve carbon neutrality. Introducing more renewable energy systems, however, tends to hinder the stability of power grids due to a limited number of synchronous generators with system inertia and synchronizing torque, as typified by thermal power generation systems.

To rectify this problem, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed the following new systems for special protection systems to maintain power grid stability by shedding the generators and loads in the event of problems: (1) a voltage stabilization system using artificial intelligence (AI) to control and maintain grid voltages within the appropriate level during normal grid operations with increasing difficulty, and (2) a resilience enhancing system to maintain rotor angle stability in case of coincident failures occurring in four-circuit bulk power transmission lines, as well as to maintain frequency stability when renewable energy systems are separated from the power grid. Special protection systems incorporating these systems can also increase the total transmission capability during normal grid operations, contributing to the mass introduction of renewable energy sources.

1. まえがき

電力系統を構成する送電線や変電設備など、多くの電力設備は自然環境にさらされており、落雷や暴風雪などの影響を受けている。そのため、系統事故や電力設備の故障に備えて、保護装置や電力系統安定化システムが設置されている。保護装置は、N-1事故（送電線1回線又は変圧器1台などの単一設備喪失を伴う事故）のような比較的軽微な事故に対して、事故が発生した電力設備を電力系統から遮断することによって事故を除去する。電力系統安定化システムは、N-2事故（送電線2回線などの2設備同時喪失を伴う事故）のような過酷事故に対して、保護装置で事故が除去された後、事故の影響が電力系統全体へ波及しないように、系統安定性を維持する制御を行い、大規模停電を防止する。また、平常時の送電可能容量は、系統事故が発生しても送電設備を損傷することなく、供給信頼度を確保できるように運用制約（同期安定性限度など）を考慮して決められ、

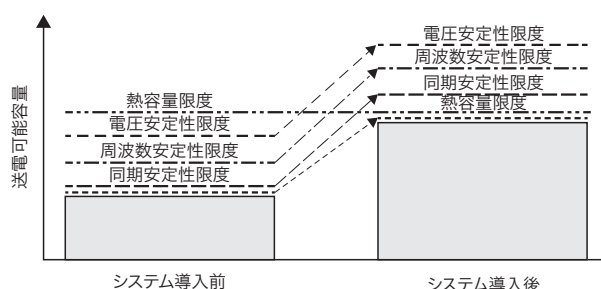


図1. 電力系統安定化システム導入による送電可能容量の増大

システムの導入により、運用制約である同期安定性限度、電圧安定性限度、及び周波数安定性限度を引き上げられる。

Total transmission capability before and after introduction of special protection system

送電設備の限度（熱容量限度）よりも抑えて運用することが多い。電力系統安定化システムを導入すると系統事故発生時の系統安定性を維持・向上できるため、図1に示すように、送電設備を増強することなく、平常時の送電可能容量

を増大でき、送電設備の有効活用によるコスト低減や、再エネ電源の導入拡大に貢献する重要なシステムである。

電力広域的運営推進機関(OCCTO)により、“2050年カーボンニュートラル”を見据えた、再エネ電源の主力電源化や電力ネットワーク強靱(きょうじん)化(レジリエンス強化)のための「広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)」が、2023年3月に公表された。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、今後更なる再エネ電源の導入拡大が見込まれる電力系統において、これまで以上に重要になる電力系統安定化システムの開発に取り組んでいる。ここでは、電力系統の事故波及現象(系統不安定現象)、電力系統安定化システムの概要、及び最近の動向に対する当社の取り組みについて述べる。

2. 電力系統の事故波及現象

電力系統で発生した事故の影響がほかの部分にも拡大・波及し、広範囲に影響を及ぼす現象を事故波及現象^{(1), (2)}といい、主に、以下の四つが挙げられる。

- (1) 脱調現象 系統事故時の電圧低下により同期発電機(同期機)の機械的入力と電氣的出力のバランスが一時的に崩れ、同期運転を維持できず、不安定な運転状態になることがある。このような現象を脱調現象という。この状態を放置すると、ほかの同期機も不安定な運転状態となり、連鎖的な発電機停止を引き起こし、系統全体に及ぶ大規模停電につながるおそれがある。
- (2) 電圧不安定現象 系統電圧は、発電機の出力・電圧・運転力率、負荷の消費電力・力率、系統構成や調相設備の運転状態など、複数の要素により決定される。これらの要素を踏まえた上で、平常時は発電機の励磁調整、調相設備の開閉、変圧器タップ調整などの電圧・無効電力制御により、常に規定範囲内の電圧値を維持している。しかし、系統事故や電力需要の急増などが発生し、系統電圧が急激に低下した場合は、平常時の電圧・無効電力制御を行っても系統電圧が定常状態に戻らず、電圧低下が継続し、系統崩壊に至ることがある。このような現象を電圧不安定現象という。
- (3) 周波数異常現象 系統事故による送電線ルート遮断や大規模発電機の停止、負荷脱落などにより電力の需給バランス(発電と需要のバランス)が崩れると周波数が変動する。また、発電機には運転可能な周波数範囲があり、この範囲を逸脱すると発電機保護のため、自動的に停止する。これにより、周

波数低下又は上昇により電力系統内の一部の発電機が停止し、周波数が低下すると、別の発電機も停止し、更に周波数が低下することで、次々に発電機が連鎖的に停止することになり、系統崩壊に至ることがある。このような現象を周波数異常現象という。

- (4) 設備過負荷現象 電力設備を流れる電力が定格容量を超える状態を過負荷といい、この状態を放置すると、電力設備の劣化・損傷や、これに伴う停電などを引き起こすおそれがある。系統事故などで一部の送電線や変圧器などの電力設備が停止すると、当該設備に流れていた電力がほかの健全な電力設備にう回して流れ、これにより過負荷に至ることがある。この対策のために過負荷となった設備を不用意に停止すると、過負荷状態が更にほかの電力設備へ移行し、連鎖的な設備停止を招くおそれがある。このような一連の現象を設備過負荷現象という。

3. 電力系統安定化システム

3.1 システム概要

事故波及現象への対策として、電力系統安定化システムで一部の発電機を遮断する電源制限(以下、電制と略記)や、負荷を遮断する負荷制限(以下、負制と略記)、調相制御などを行って、ほかの発電機の同期運転や電力の需給バランス、系統電圧を保持し、電力系統の安定運用を維持する。近年では、時々の系統情報(発電所や変電所の電気量、遮断器などの開閉状態など)をオンラインで収集し、系統事故の発生を想定した電力系統シミュレーションを行って制御内容を決定する、オンライン事前演算形の電力系統安定化システムの適用が進んでいる。このシステムは、図2に示すように、シミュレーションを行って制御内容を決定する

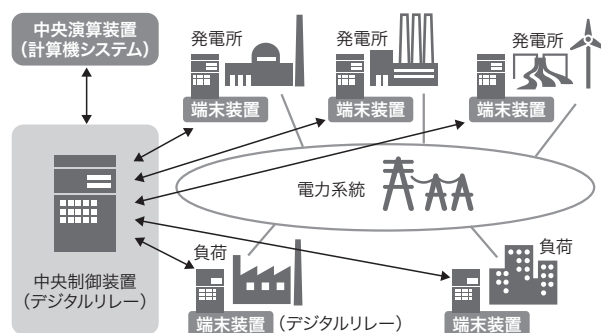


図2. 電力系統安定化システムの主な構成機器

主として、中央演算装置は計算機システム、中央制御装置と端末装置はデジタルリレーで構成される。

Main special protection system equipment

中央演算装置、実際に系統事故が発生した際に制御指令を出力する中央制御装置、及び変電所や発電所で事故検出や制御を行う複数の端末装置で構成される。

平常時は、時々刻々と変化する電力系統の状態に追従して、定周期（30秒周期など）で制御内容を更新する。中央演算装置は通信ネットワークを介して、その時点の系統情報をオンラインで収集し、系統事故の発生を想定したシミュレーションを行って制御内容を決定する。中央制御装置は中央演算装置から制御内容を受信し、保存する。制御内容は想定する系統事故の種別ごとに、電力系統の安定運用維持に必要な制御を設定したものである。

系統事故発生時には、系統事故が発生してから数百ミリ秒以内に電制などの制御を行う。落雷などの系統事故が発生した際、端末装置で事故を検出し、事故情報を中央制御装置へ送信する。中央制御装置は、受信した事故情報と保存していた制御内容とを照合し、制御指令を端末装置へ送信する。制御指令を受信した端末装置が発電機などの制御対象を遮断する。

3.2 系統安定化対策

電力系統安定化システムは、事故波及現象に対して、主に、以下の四つの系統安定化対策を行い、大規模停電を防止する。

- (1) 同期安定性対策 系統脱調（複数の発電機が脱調する現象）が想定される事故が発生した際に、一部の発電機を遮断（電制）することによって、ほかの発電機の同期運転を維持する。脱調現象を系統全体に波及させないために、系統分離を行うこともある。
- (2) 電圧安定性対策 電圧異常が想定される場合に、調相設備の入り切り制御による無効電力制御を行う。電圧低下防止には電力用コンデンサー、過電圧防止には分路リアクトルを並入する。なお、過負荷により電圧低下となる場合は負制、連系線遮断や電制などにより急激な電圧過昇となる場合は送電線遮断、電力動揺により電圧異常となる場合は電制を行う。
- (3) 周波数安定性対策 周波数の緊急制御が必要となる事故に対し、周波数上昇時は電制、周波数低下時は負制を行い、周波数を規定の範囲に維持する。
- (4) 過負荷防止対策 系統事故により過負荷発生が見込まれる場合に、電制や負制により送電線の潮流抑制や、過負荷となる送電線や変圧器の遮断などを行い、過負荷を未然に防止する。

3.3 当社の納入実績

オンライン事前演算形電力系統安定化システムについて

表1. オンライン事前演算形電力系統安定化システムの納入実績

Main special protection system equipment

No	電力会社	システム名	納入時期	系統安定化対策
1	A社	基幹系TSCシステム	1995年 (No.5に統合)	・同期安定性
2		電源系安定度維持装置(a系)	1996年 (No.5に統合)	・同期安定性
3		電源系安定度維持装置(b系)	1998年 (No.5に統合)	・同期安定性
4		電源系安定度維持装置(c系)	2002年 (No.5に統合)	・同期安定性
5		オンライン系統安定度維持システム	2009年 (No.7に更新)	・同期安定性
6		d方面系統安定化システム	2012年 (No.8に更新)	・同期安定性 ・電圧安定性 ・周波数安定性
7		基幹系統合型系統安定化システム	2017年	・同期安定性 ・周波数安定性 ・過負荷防止
8		d方面統合型系統安定化システム	2023年	・同期安定性 ・電圧安定性 ・周波数安定性
9	B社	基幹系系統安定化装置	1997年 (No.11に統合)	・同期安定性
10		e系系統安定化装置	2011年 (No.11に統合)	・同期安定性 ・周波数安定性 ・過負荷防止
11		基幹系系統安定化装置	2019年	・同期安定性 ・電圧安定性
12		基幹系統合型レジリエンスシステム	2023年	・同期安定性 ・電圧安定性 ・周波数安定性
13	C社	基幹系過渡安定化制御システム	2005年	・同期安定性 ・過負荷防止
14	D社	500kV統合型事故波及防止リレー	2013年	・同期安定性 ・電圧安定性 ・周波数安定性 ・過負荷防止
15	E社	オンラインSSCシステム	2018年	・同期安定性 ・周波数安定性 ・過負荷防止
16		転送遮断装置	2018年	・周波数安定性
17	F社	500kV f系SCS	2021年	・同期安定性

TSC : Transient Stability Control SSC : System Stability Control
SCS : Security Control System

の当社の納入実績を表1に示す。当社は、1995年以降、多数のオンライン事前演算形電力系統安定化システムを開発・納入している。

4. 最近の動向と当社の取り組み

再エネ電源の大量導入の影響に対応するため、当社は、電力系統安定化システムに関して、AI技術の適用や、レジリエンス対応、N-1電制などの新たな取り組みを進めている。

4.1 再エネ電源大量導入の影響

電力系統へ再エネ電源が大量導入されると、主に、以下の三つの要因により、電力品質や系統安定性（同期安定性、電圧安定性、周波数安定性）に影響が出る。

- (1) 同期機比率の減少 火力発電などの同期機は系

統安定性を維持するための慣性力・同期化力を備えているが、インバーターを介して系統連系される再エネ電源は、一般的に慣性力・同期化力を持っていない。そのため、再エネ電源が大量導入され、その分の同期機が停止すると、総発電量に対する同期機の割合が減少し、系統安定性維持能力が低下する。

(2) 再エネ電源の出力変動 太陽光発電や風力発電などは天候により出力が変動するため、潮流変動や電圧変動、周波数変動の原因となる。

(3) 再エネ電源の動特性・脱落特性 インバーターの制御機能、保護機能により電圧や周波数が変化した際に運転を停止する可能性がある。系統事故時にインバーターを介して系統連系している再エネ電源が多数運転停止すると大幅な周波数低下を招き、電源の連鎖脱落に至ることがある。

4.2 当社の取り組み

4.2.1 AI技術の適用

再エネ電源の導入拡大などに伴う電力系統の過酷化により、平常時における電圧安定性維持の難易度が高まっている。そのため、当社はAIの学習機能を活用して、様々な系統状態へ柔軟に対応し、平常時の適切な電圧制御を行う電力系統安定化システムを開発した。事前に、オフライン環境で、最適な制御の探索結果から学習データ及びAIモデルを構築する。その後、オンライン環境で、実際の系統状態に応じた制御値をAIモデルにより導出し、適切な電圧制御を実現する。

4.2.2 レジリエンス対応

再エネ電源の導入拡大や、2018年9月に発生した北海道エリアの全域停電を踏まえ、電力系統のレジリエンス強化が求められている。そのため、当社は、これまで対策不要とされていたN-4事故（基幹送電線4回線同時事故）発生時に対する同期安定性対策や、周波数低下時に再エネ電源などが不必要に解列し、想定以上に周波数が低下するリスクに対する周波数安定性対策などの機能を備えた電力系統安定化システムを開発した。周波数安定性対策では、リアルタイムで潮流状況を監視し、その状況に応じて、遮断対象とする送電線の選定、及び遮断順位の組み替えを行うことで適切な遮断量を確保している。

4.2.3 N-1 電制

日本版コネクト&マネージ^(注1)の取り組みの一つとして、N-1事故時に瞬時に電制を行うことで運用容量を拡大する

ためのN-1電制の適用が進んでいる。従来、N-1事故時は電制などを行うことなく、供給に支障がないように運用制約や設備増強を行うことが必要とされてきた。そのため、ほとんどの送電設備は2回線以上で構成され、1回線で系統事故などが発生しても、ほかの1回線で送電できるように送電容量を抑えて運用されていた。N-1電制装置を導入した送電設備では、N-1事故が発生した際に過負荷を防止する柔軟な対策が行えることから、既存送電設備の送電容量を増加させることができる。これによって、これまで運用制約で連系できなかった箇所にも再エネ電源を連系させることが可能となる。

5. あとがき

電力系統の安定運用だけでなく、再エネ電源の導入拡大にも寄与する電力系統安定化システムの概要と最近の動向に対する当社の取り組みについて述べた。洋上風力発電の導入拡大や直流送電連系新設など、電力系統は今後も大きく変化することから、電力系統を安定運用するための更なる対策が必要となる。今後も当社は、将来の系統構成の変化にも対応した電力系統安定化システムを開発・納入することで、持続可能なカーボンニュートラル社会の実現に向けて貢献していく。

文 献

- (1) 横田明彦, 太田宏次, 電力系統安定化システム工学, 第1版, 電気学会, 2014, 235p.
- (2) 電気協同研究会, 電力系統を取り巻く環境変化がもたらす系統安定化システムの課題と対応, 電気協同研究, 77, 1, 2022, 162p.



星野 友祐 HOSHINO Tomohiro
東芝エネルギーシステムズ(株)
グリッド・ソリューション事業部 電力系統システム技術部
電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



犬塚 直也 INUZUKA Naoya
東芝エネルギーシステムズ(株)
グリッド・ソリューション事業部 電力系統システム技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.

(注1) 既存の電力設備を最大限に活用するための新しい系統運用ルールであり、再エネ電源の連系量を増加させる考え方。主に“想定潮流の合理化”, “N-1電制”, 及び“ノンファーム型接続”の三つの対策が行われる。