

2次スクリーニングで終了とする案件

「発電所の配電系統電圧の妥当性」について

平成 27 年 7 月 27 日
原子力規制庁

1. 米国情報 RIS2011-12「発電所の配電系統電圧の妥当性」について

(1) 事象の概要

Millstone 2 号機(米国、PWR)において 1976 年 7 月に当該原子炉が自動停止した際に、外部送電網の電圧が 352kV から 333kV に低下した。その結果、外部電源に接続される所内の電源電圧も下がり、原子炉停止に伴って起動しようとした補機類が次々と過電流でトリップした。これを受けて、NRC は、全認可取得者に対して、劣化電圧保護リレー(DVR: Degraded Voltage Relay)の設置を要求した。

(2) 対応策に関する問題点

以上の対応策に関して、多くのプラントで認可取得者による誤った劣化電圧保護リレーの適用が検査官から指摘されている。当該情報では、下記の事例が紹介されている。

- ① 特定の変圧器以外から受電した場合に、劣化電圧保護機能が不適切にバイパスされてしまう。
- ② 劣化電圧保護リレーの作動電圧設定が不適切であり ECCS 系を動作させるのに低すぎた。
- ③ 設計基準事象(特に LOCA(冷却材喪失)事象)に対して、劣化電圧保護リレーの遅延時間設定が不適切であり、解析条件に比べて安全系機器の起動タイミングが遅延する。

2. 当事国の対応

NRC は、前述の通り、DVR の設置を事業者に要求し、標準審査指針(Standard Review Plan)の BTP(Branch Technical Position)8-6 でその要求事項を次のように示している。

- (1)従来から設置されている外部電源喪失(LOOP: Loss of Offsite Power)を検知する不足電圧リレーに加えて第二のレベルの不足電圧リレーである劣化電圧リレー(DVR: Degraded Voltage Relay)を設けること。
- (2)DVR の設置にあたっては、IEEE(米国電気電子学会)規格 std741-2007「原子力発電所におけるクラス 1E 電源システム及び機器の保護に関する標準規格」*に記載されている設計基準、設計機能及び試験要件に準拠すること。

*IEEE std741-2007 記載の DVR 設計要件概要を図1に示す。

- (3)DVR には、2 段階のタイマーを設けること。1 つ目は、電動機起動時の過渡電圧変動を避け、かつ持続的な電圧劣化状態の存在を早めに運転員へ知らせるためのもの。2つ目は、低電圧での電動機起動により、機器が損傷するのを防止するため、1つ目のタイマーより十分長い時間が経過した後、非常用母線を外部電源から非常用ディーゼル発電設備(EDG)へ自動的に切り替えるためのものである。
- (4)設定値は、予想される外部電源の最小電圧とプラントトリップ時、冷却材喪失事故時、起動停止時等における最大負荷状態および電動機起動時の過渡電圧変動を考慮した解析を行い決定すべきである。また、この解析に用いた手法と仮定は、実測によって検証されなければならない。

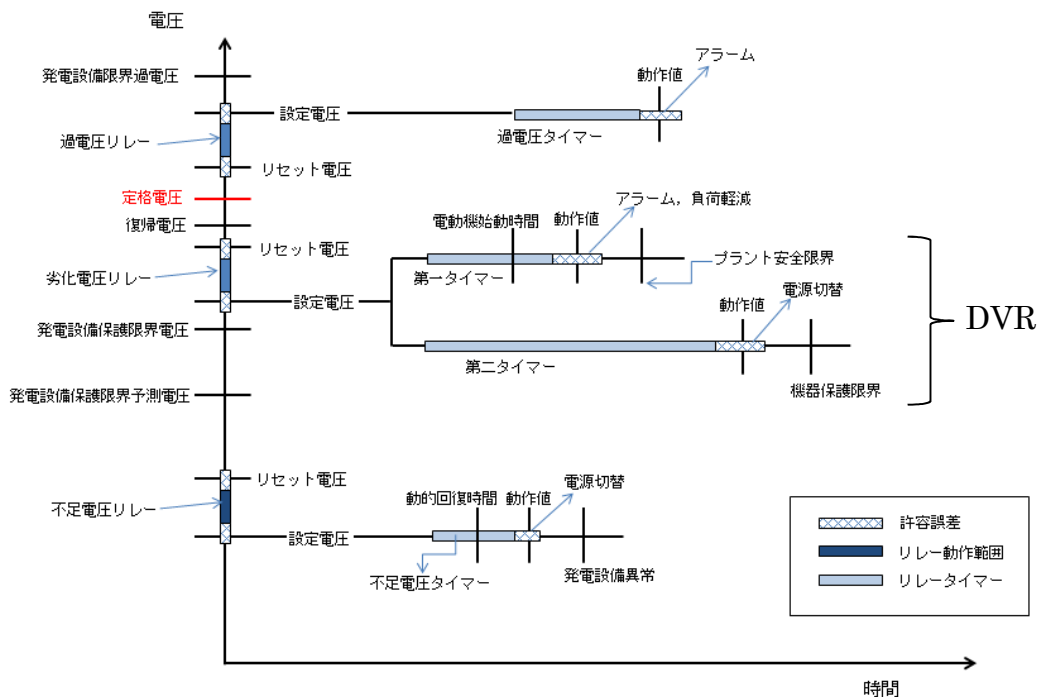


図1 IEEE Std741-2007 に記載の DVR 設計概要

尚、DVR 設置後、米国でシステムの劣化電圧状態が検知された例は存在するが、タイマー設定値内で電圧が回復した等の理由により、実際に DVR が作動した事例はない。

3. 国内の電力系統の状況

国内の電力系統の信頼性について、事業者との面談、文献調査等により確認を行った。

(1) 電圧変動に対する基本的な考え方

電力系統の安定性確保において、最も重要な要素の一つが電圧である。電圧の維持に関しては、電気事業法第26条第1項に、「電気事業者は、その供給する電気の電圧及び周波数の値を経済産業省令で定める値に維持するように努めなければならない。」とあり、その具体的数値については、電気事業法施行規則第44条に、低圧需要家側での許容電圧範囲は「 $101 \pm 6V$ 、 $202 \pm 20V$ に維持するように努めなければならない。」と規定されている。

このため、上位系統の電圧を需要家設備も含めて電力機器が正常に機能するように調整するとともに、最終的に配電電圧に係る上記の規定値を満足させる必要がある。

事業者は、電圧の変動を、常時変動、瞬時変動（機器操作時）、設備故障時変動に分類して、それぞれ表1のような設備設計基準を作成している。

表1 電圧変動に対する供給場所での設備設計基準の例

電圧変動の種類	変動の要因	設備設計基準
常時変動	発電設備の出力変動	常時電圧の $\pm 1 \sim 2\%$ 程度
	日々の需要変動	常時電圧の $\pm 1 \sim 2\%$ 程度
瞬時変動	発電設備の並解列	常時電圧の $\pm 2\%$ 程度
	調整設備等による電圧変動	常時電圧の $\pm 2\%$ 以内
設備故障時変動	発電側要因に伴う原子炉停止等	電圧安定性が維持できること
	系統側要因に伴う送電線開放等	電圧安定性が維持できること

(出典:事業者との面談で口頭で確認したもの)

(2) 電力系統の設計・運用

- ① 電力系統は、電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン・電力系統利用協議会ルールに従い、電圧の常時変動は、常時電圧の概ね $\pm 1 \sim 2\%$ 以内に維持されている。
- ② 設備故障時は、事故箇所付近において一時的に電圧が常時の電圧変動より低下する場合もあるが、各種の保護制御装置により、速やかに常時電圧の範囲に復帰する。
- ③ 給電指令所や給電所で常時系統監視が行われており、万が一保護制御装置により適正な電圧が維持できない場合には関係箇所への連絡や手動操作等により迅速に対応する。

- ④ 東日本大震災、中越沖地震等において、各種保護制御装置により継続的に電圧・周波数を維持した実績がある。

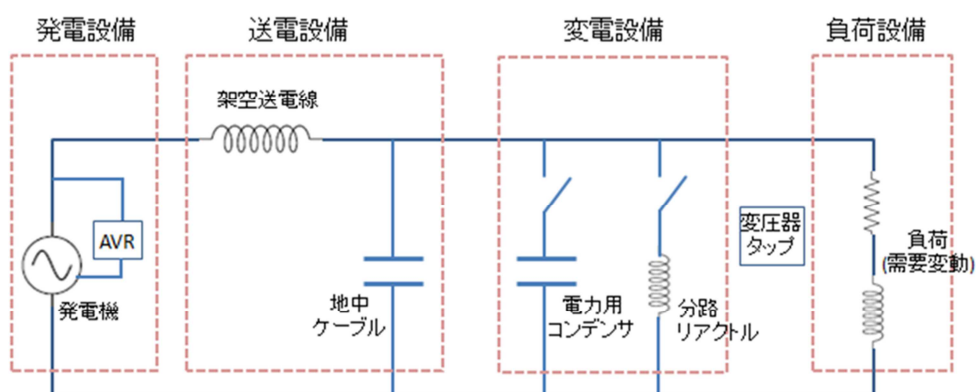
(3) 電力系統における電圧制御

国内においては、電圧変動による影響が系統全体に波及しないように、表 2 に示すような制御方法により、電圧安定化対策が講じられている。また、図 2 に基本的な電圧制御モデルを示す。

表 2 系統電圧の安定化対策

	制御設備、装置	制御の特徴	応答速度
計画段階	送電線強化	線路インピーダンスの低減により系統電圧変動を抑制	—
	無効電力供給強化	線路キャパシタンスの増加により系統電圧変動を抑制	—
運用段階	発電機 AVR	無効電力を調整し、発電機端子電圧を一定に制御	数 10msec
	静止型無効電力補償装置(SVC)	連続的、高速に無効電力を制御	40～60ms
	電力用コンデンサ(SC)	無効電力を供給し系統の電圧低下を抑制	200～500ms
	分路リアクトル(ShR)	無効電力を吸収し系統の電圧の上昇を抑制	200～500ms
	負荷時タップ切替器(LTC)	変圧器の変圧比を調整して電圧を制御	200～500ms

(出典:参考文献の複数の資料を参考に作成したもの)



※SVC は、SC、ShR、変圧器等で構成され、サイリスタを用いて高速・連続制御を行う装置

図 2 電圧制御モデル

(4) 電力系統の安定化

電力系統は、発電設備と送・変・配電設備からなる巨大システムとして構成されており、電力系統の安定化は実際には電圧安定性だけで確保するものではなく、全系的観点から安定性の確保を行う必要がある。我が国では、1987年7月に、基幹系統の電圧不安定現象による大停電事故を経験しているが、その後、電力系統へのIT技術等の活用が積極的に進められ、対象とする電力系統の構成や規模、想定する事故や制御対象の状況、制御時間等の種々の条件を考慮して、電力系統の最適設計が行われている。図3に実際に国内で行われている系統安定化方策の例を示す。

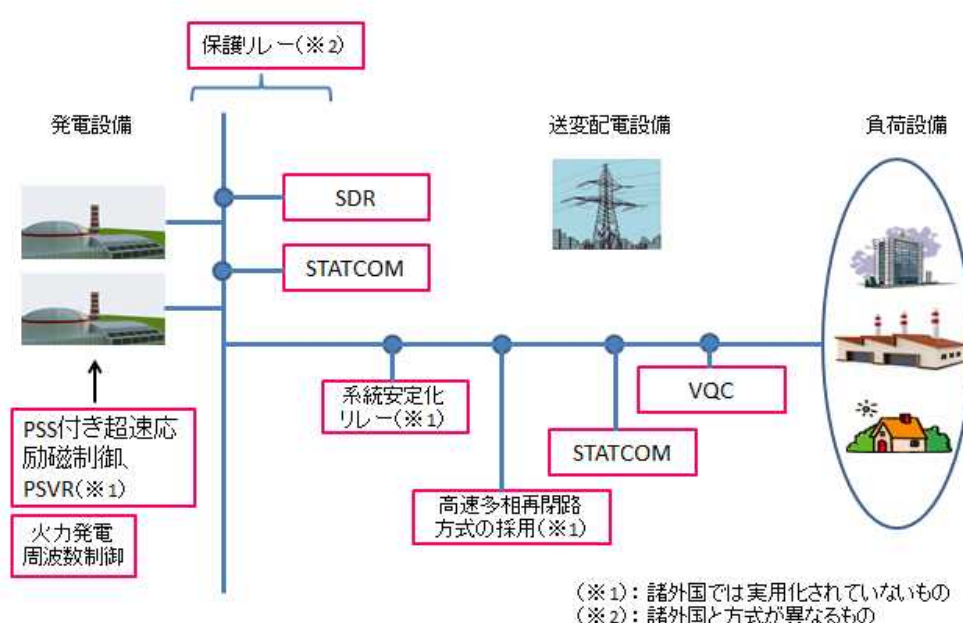


図3 国内で実施されている系統安定化方策の例

(出典: 参考文献の複数の資料を参考に作成したもの)

【図3の用語の説明】

- ・PSS(電力系統安定化装置): 発電機の AVR(自動電圧調整装置)に補助信号を導入して、ダンピングを増すように励磁を制御する装置
- ・PSVR(送電電圧制御発電励磁装置): AVR(自動電圧調整装置)に送電線送り出し母線電圧の補正信号を直接加えることにより、送電線送り出し母線電圧が基準値になるように自動的に調整する装置
- ・SDR(制動抵抗装置): 流通側事故発生時に、電源の安定運転を維持するよう、負荷を適正に制御する装置
- ・STATCOM(無効電力補償装置): 無効電力を連続的に高速に制御する装置
- ・VQC(電圧無効電力制御装置): 変電所の母線電圧や変圧器通過無効電力が基準値になるように LTC(タップ切替器)や調相設備を自動的に制御する装置
- ・系統安定化リレー: 電力系統内の異常が全系に拡大・波及していくことを防止し、電源の安定運転を維持するよう、電源・流通の連系状態を適正に制御する装置
- ・保護リレー: 電力系統・電力機器の故障や異常を検出し遮断器を開放してその設備を停止する装置

- ・高速多相再閉路方式：流通側事故発生時に電源の安定運転を維持、早期の事故復旧を図るために送電線の遮断器を適正に制御する方法

(5) 電力系統の運用実績

近年発生した、大規模地震や送電線事故における電力系統への影響を以下にまとめた。

表 3 近年発生した電力系統の異常事象

事象(発生日)	事象の概要
東日本大震災 (2011年3月11日)	<ul style="list-style-type: none"> ・地震発生後、太平洋沿岸の発電所等が停止し、大規模な電源脱落が発生 ・地震により電力需要が大幅に減少
中越沖地震 (2007年7月16日)	<ul style="list-style-type: none"> ・地震発生後、柏崎刈羽3/4/7号機で原子炉が自動停止し、大規模な電源脱落が発生 ・東側電源から西側に流れる潮流が増加
500kV 送電線のギャロッピング現象によるルート断事故 (2005年12月22日)	<ul style="list-style-type: none"> ・送電線の電線への着雪と強風により、ギャロッピング現象が発生し、度重なる送電線の短絡により、2つの電源送電線でルート断事故が発生 ・発電所への送電が停止、大飯1~4号機が所内単独運転を開始、その後大飯1/2号機の原子炉が停止

※ギャロッピング現象：送電線に雪や氷が付着した状態で強風が吹き寄せたとき、送電線が上下に激しく振動する現象

事業者との面談により、いずれの事象の場合にも、系統各部の調相設備／機器による無効電力のバランス制御や系統連系等が実施され、表1の設備設計基準を満たす運用が行われたこと、及び原子力発電所が接続されている変電所や所内の母線（除く、所内単独後の大飯1~4号機）等における電圧の変動が、2%以内となっていることを確認した。

(6) 国内の電力系統の信頼性のまとめ

- ① 国内では、各種の調相設備／機器や安定化装置、系統運用方策等により電力系統全体として安定性が十分に確保されている。
- ② 各事業者は、国のガイドライン（電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン）に従い、系統電圧の適正な維持及び系統連系を行っており、近年の運用実績においても、国のガイドラインに定められている常時の電圧変動1~2%の範囲内を確保している。
- ③ 近年発生した大規模な系統異常時の運用実績においても、電圧変動は2%以内となっている。

4. 国内と米国の電力系統制御の違いについて

米国の電力系統は、東部系統、西部系統、テキサス系統の3つに分割されているが、Millstone 発電所は東部系統に属している。2003年8月に、東部系統で大停電が発生した後、日本の調査チームが現地調査を行っており、日米間の電力系統の差異について以下のように報告されている。

- ・国内の電力系統では、原則として電力会社間は一点のみで連系されており、事故等が発生した場合には、系統分離により、事故の影響を他の電力会社のエリアに波及させないような設備形成と運用が実施されている。

また、一つの電力会社の供給エリア内においても、系統分離により、事故の影響を極小化するような措置が講じられている。

- ・米国の電力系統は、メッシュ状の系統構成となっていて、事故の影響を系統全体で吸収するという考え方が取られており、日本のように、系統分離により事故波及を極小化する「事故波及防止リレーシステム」に類する装置は設置されていない。

国内では、「事故波及防止リレーシステム」の高度化が進められており、例えば、「事故波及防止リレーシステム」の一つである中央制御方式の周波数リレーシステムにおいては、基幹系統送電線のルート事故で分離系統が発生した場合を想定し、分離系統内の周波数変動を管理可能な範囲内に抑えるために必要な電源または負荷などの制御方法を、事前潮流と系統容量から事前に計算している。これにより、実際に事故が発生した場合には、緊急制御が的確に実施され、事故の影響が最小化されている。図4に、中央制御方式の周波数リレーシステムの動作事例を示す。

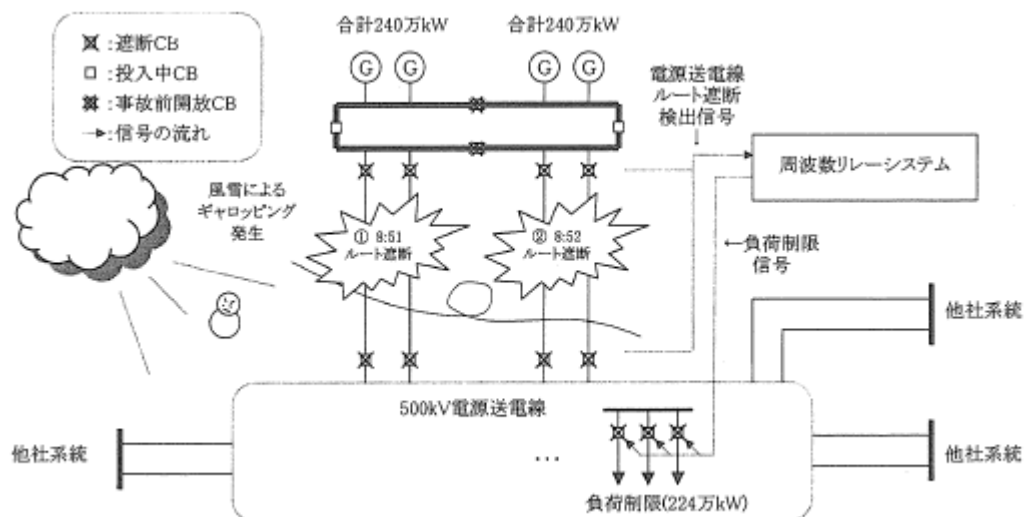


図4 広域系統での周波数リレーシステムの動作事例 (出典:参考文献(5))

5. まとめ

日本の電力系統には、以下のような特徴がある。

- ・ 各種の調相設備／機器や安定化装置、系統運用方策等により負荷のバランス等が適切に制御され、電力系統の安定性が確保されている。
- ・ 原子力プラントは、直接上位階級の電力系統に接続されており、当該電力系統は、原子力プラントが脱落した場合においても電圧の変動が小さくなるよう計画、運用されている。このため、電力系統に異常が発生した場合の実績としても、原子力発電所が接続されている変電所における電圧の変動幅が 2%以内に収まっている。

したがって、現在の電力系統の状況を踏まえれば、我が国において DVR を導入する必要はなく、現状においては、新たな規制対応は不要と考えられる。

【参考文献】

- (1)「流通設備計画ルール」、東京電力株式会社、2015 年改定
- (2)「系統操作ルール」、東京電力株式会社、2015 年改定
- (3)保護リレーシステム技術委員会技術報告「保護リレーの方式・運用の現状と海外技術動向」、電気学会、2015 年
- (4)横山明彦、太田宏次「電力系統安定化システム工学」、電気学会、2014 年
- (5)保護リレーシステム技術委員会技術報告「周波数リレーシステムによる事故波及防止技術」、電気学会、2008 年
- (6)「2003 年 8 月 14 日 北米北東部停電事故に関する調査報告書」、北米北東部停電調査団、2004 年
- (7)長尾待士、他「電力系統の電圧安定性解析手法の開発」、電力中央研究所、1995 年
- (8)道上勉、他「電圧安定性を向上する新しい発電機励磁制御方式(PSVR)の開発・適用」、電学論 B、VOL110、No.11、P.887-894、1990 年
- (9)阪部貞夫、下島清志「500kV 低インダクタンス送電線の開発」、日立評論、VOL.63、No.9、1981 年