2.7 大災害時にも電気を届けるには

「天災は忘れた頃にやって来る。」と言ったのは物理学者の 寺田寅彦と言われている。阪神・淡路大震災からすでに 20 年以上が経過し、東日本大震災からも 6 年が経った。自然災害の多い国土に住む私たちは、大震災のようなつらい災禍をきれいさっぱり忘れて、毎日を明るく生きていきたいと思う習性を持っているのかもしれないが、今は次なる自然災害に備えて十分な用意をする時期であろう。特に電気に支えられた現代の社会では、大災害による停電は私たちの生活を一変させてしまう。マンション高層階の住人はエレベータ停止により移動に大変な苦労をするであろう。また電車が停止して通勤・通学に時間がかかり会社や学校は正常に機能しなくなる。もちろんモーターを使ってポンプを動かして供給される水やガスも停止し、夜間の照明は無く、スマートフォンも充電できずに通信手段を失う。東日本大震災では多くの人々がこのような経験をしたと思う。

一方、電気を供給する側はどうなるのかというと、大津波が発生するような大震災の場合、沿岸部に位置する大型火力発電所や原子力発電所が津波による浸水等が原因で長期間停止することになろう。しかし図 2.7.1 に示すように東日本大震災の場合には、電力技術者の懸命な復旧活動により一週間程度でほとんどの停電が解消されている。ただし都市近郊直下型地震による阪神・淡路大震災と大きく異なり、電気の発生源である発電所(以下、電源)が多大な損害を受けたため、長期間に亘る供給力不足が生じ、東京電力管内では 10 日間の計画停電(輪番停電)が実施された。この経験から得られる教訓は、大災害時には、とにかく電源を確保することと言える。

さて、大きな自然災害が起きた時でも電気を送り届けられる電気のネットワーク(電力系統または電力システムと呼ぶ)の能力は、レジリエンスという視点から整理すると次の4項目で特徴づけられる。なお、レジリエンスとは、何かのインパクトでシステムが破壊されたとき、元に復元する能力(回復力)のことである。

- ・丈夫さ Robustness:電力システムを構成する発電所や送電線の一部が破壊されても停電を起こさずに消費者に電気を届けられる能力。
- ・余裕 Redunduncy: 電気を送るルートが複数存在するなど多 重化されていること。
- ・動員力 Resoucefullness: 局所的に電気を供給できる電源車の保有台数や他電力会社等からの応援要員の人数など。
- ・回復の速さ Rapidity: 停電発生時から復電(停電解消) するまでの時間。

このレジリエンスをどのような方法で向上させることができるかという点を、国では将来発生が予想されている南海トラフ巨大地震や首都直下型地震を念頭に置いて検討している。その代表的な方法としては、電力システムのシミュレーションにより停電規模を事前に把握する方法や、災害で停止した大型火力発電所の運転を早期に再開する方法など、主に

電気の送り手側に関する対策が考えられている。

他方,大学などでは電気を消費する側の手段として,家の 屋根に設置された太陽光発電装置(以下,PV)を非常用電源 として利用する方法,特に電気自動車(以下, EV)に積載さ れている蓄電池と組み合わせることで夜間でも電気を利用で きる方法が検討されている。ただし、この方法はEVやPVを 所有していない人には適用できない。そこで PV や EV を所 有していない人でも電気を得る方法として,被害を受けなか った電力システムのネットワーク設備を活用する「自立運転 配電ネットワーク IDN」という方法が提案されている。この 概略を図 2.7.2 に示す。このような電力ネットワーク設備の使 い方を単独運転と呼び、現在、この運転は安全性の観点から 法律で禁止されている。ただし非常時に限って単独運転が許 されるならば、PVとEVを所有していない人も災害時に電気 を利用できることになるであろう。この IDN を実現するため には、ネットワークの電圧を適正値に保ちながら電灯や冷蔵 庫などの負荷機器と PV や EV を一緒に調子を合わせてコン トロールするためのエネルギー管理システムを開発する必要 がある。また IDN を普及させるためには、コストパーフォー マンスの良い技術を開発しなければならないという課題もあ

これまで停電が起きない電力システムを構築するため種々の技術が開発されてきたが、人知を超える自然災害に対して停電を皆無にすることは不可能であろう。しかし電力システムの一部の設備が破壊されて停電が発生しても、破壊されずに残った健全な設備を上手く使用する技術を開発すれば、大災害時にも安全かつ効率的に電気を届けられる電力システムが構築できるであろう。

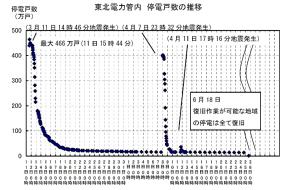


図 2.7.1 東日本大震災における停電解消の様子

出典:経済産業省:「原子力安全・保安部会電力安全小委員会電 気設備地震対策ワーキンググループ報告書(案)参考資料」、2012 年3月

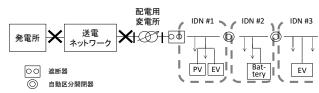


図 2.7.2 自立運転配電ネットワーク IDN の概念図

3.7 大災害時における電力システム運用

3.7.1 はじめに

我が国の電力システムは夏季の台風、冬季の暴風雪など毎年繰り返し厳しい自然環境にさらされている。また地震や火山が多い国土であるため、これらの自然現象の被害を受ける可能性も高い。記憶の新しいところでは1995年1月の阪神・淡路大震災や2011年3月の東日本大震災が広域の停電を引き起こした。また我が国に限らず2012年10月の米国東部でのハリケーンの上陸により大規模停電が発生している。

本稿では、地震・津波・暴風雨による電力システムの被害の特徴とその対策を紹介する。対策についてはレジリエンス (Resilience,回復力、弾力性)という視点から電力システムに望まれる性質や機能を整理している。また私案であるが、レジリエンス向上方策として、災害時に生き残った分散電源と配電ネットワークを活用する電力供給のコンセプトも紹介する。

3.7.2 自然災害による電力システムの被害

電力システムにとって代表的な自然の脅威は雷である。しかし、避雷・絶縁・保護システム技術の高度化により雷が原因となる大停電は現代の日本では稀である。大停電を引き起こす最たる自然災害はやはり地震と台風であろう。地震による大停電と言えば1995年1月17日の早朝に発生した兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災である。この災害により約260万軒が停電し、停電解消まで6日間ほどかかっている。都市近郊で発生した直下型地震であったので、架空配電設備の被害が多かったようである(1)(2)。

また 2011 年 3 月 11 日午後に発生した東北地方太平洋沖地震による被害は甚大で、発生した停電は東北電力管内で約466 万軒(全戸数の約70%、8 日後に約94%停電解消)、東京電力管内で約405 万軒(全戸数の約20%、7 日後にすべて停電解消)であった。この震災の特徴は東北地方北部太平洋沿岸から関東地方北部沿岸までの広い範囲で大津波が発生し、それによる沿岸部の火力・原子力発電所が浸水被害を受けた結果、電力供給源を失った点である(3)(4)。

台風については我が国では毎年 2,3 個の台風が上陸しており、それに伴う暴風雨や土砂崩れによる被害は絶えることが無い。しかし幸いなことに近年は阪神・淡路大震災クラスの大規模停電を発生させてはいない。一方、米国東部において2012年10月29日にハリケーン・サンディが上陸し、広範囲で停電を発生させた。停電件数は約860万軒と東日本大震災のときの停電に匹敵している。文献(5)によると完全復旧するまでに10日間以上を費やしている。

これらの自然災害による電力システムの被害を図として簡略表現したのが図 3.7.1 である。地震による直接的被害としては,鉄塔や電柱の倒壊等による送変電・配電設備の損傷があり,電力分配機能の低下により停電を招く。津波は沿岸に位置する発電所を浸水させる危険性があり,発電能力不足による停電を引き起こす。台風などの暴風雨は上陸した経路に依

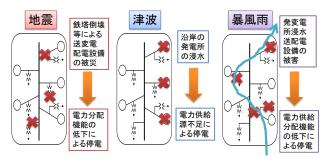


図 3.7.1 自然災害による電力システム設備の典型的な被害

存するが,発電所や変電所の浸水,送配電設備の損傷により 停電が広域化する可能性がある。

3.7.3 電力システムのレジリエンス

前述した自然災害に代表されるインパクトを電力システムが受けた際、如何に可能な限り速やかに健全な状態に回復できるのかをレジリエンスという視点から整理してみる。まず、物理的・社会的システムのレジリエンスを特徴づける項目を文献(7)に従って示すと表 3.7.1 の第 1 列目のようになる。第 2 列目には、著者が各項目に対応すると考える電力システムの性質と機能を記している。

Robustness は、システムの機能性を失わずにサービスを提供できるシステム固有の能力を指す。電力システムに対応させてみると、被害を受けても発送配電の機能を失うことなく需要に電力供給を行える能力、要するに停電を起こさない能力であり、電力システムの"丈夫さ"と言える。

Redundancy は代替となる選択肢や代用となる物を備えている性質を指し、電力システムで言えば送電ルートが複数あること、中央給電指令所のバックアップがあることなど、設備が多重化されていることに相当する。すなわち停電を起こさないための電力システムの"余裕"を表わしている。

Resourcefulness は緊急時に必要な物資やサービスを動員できる能力を意味している。電力システムでは、設備の保守・ 点検時に使用される電源車の保有台数や災害時に他電力会社 等から人員等の応援の得やすさなどが対応すると思われる。 要するに、停電してもそれを軽減できる"補う力"あるいは "動員力"と言ってもよいであろう。

Rapidity はシステムの機能が復旧する速さを指し、電力システムでは停電発生時から復電するまでの時間に対応する。

表 3.7.1 自然災害に対する電力システムのレジリエンス

レジリエンスを評価する項目	対応する電力システムの性質・機能
Robustness 丈夫さ	◎停電しない能力:電力設備の地震動耐力、浸水耐力など
Redundancy 余裕	◎電力設備の多重化: 送電ルートの複数化、中央給電指令所 のバックアップなど
Resourcefulness 動員力	◎緊急時の動員力: 電源車の保有、他組織からの支援など
Rapidity 回復の速さ	◎停電からの復旧時間:復旧要員の人数、技術水準などに依存

要するに健全状態に戻る"回復の速さ"を表わしている。なおこの速さは復旧要員の人数や技術水準に依存する。

さて、システムの丈夫さと回復の速さを定量的に示したのが図 3.7.2 である。システムの丈夫さは、被害を受けた直後 (時刻 t₀) のサービス提供能力によって表わされる。またサービス提供能力が、被害を受ける前のレベルにまで回復する 過程の傾きが回復の速さに対応する。したがって、被害直後のサービス提供能力が大きく、回復するまでの時間が短いシステムがレジリエンスの高いシステムである。

このレジリエンスの定量的な見方を図 3.7.3 に示す東日本大震災における停電戸数の推移とハリケーン・サンディのときのデータ⁽⁵⁾に適用してみると、おおよそ表 3.7.2 に示す数値が得られた。ただし、東北管内と東京管内の電力システムが地震や津波によって受けたインパクトの大きさは異なるので表 3.7.2 に示した数値の単純比較はできないが、米国のハリケーンの場合よりは早期に回復できているようである。電力システムのような巨大なインフラシステムの復旧過程には、送配電設備と需要の地理的広がり、復旧要員の行動力など多様な要因が絡んでいる。したがって、レジリエンスを正確に評価するためには停電戸数の減少過程の因果関係をきめ細かく分析し、それに基づく対策を立てておくことが、将来の大災害に対する備えになると思われる。

国では将来発生が予想されている南海トラフ巨大地震や首都直下型地震を念頭に電力システムのレジリエンスを向上させる方策を検討し、電力安全小委員会の報告書⁶⁰としてまとめている。それに依ると大規模電源・基幹送変電設備側の対策として次の方策が挙げられている。

- 想定被災ケースの電力需給シミュレーションによる 供給支障量の把握
- 中長期的視野の設備形成
- 火力発電の早期再開運用法,増出力運転活用など
- 技術水準を維持した復旧要員の確保
- 復電の優先順位の判断基準の合意形成・最適化
- 公的機関等への非常用発電導入の推奨

3.7.4 分散電源を活用したレジリエンス向上方策

(1) 提案されている方策 前述した電力システムのレジリエント向上方策は主に大規模電源と基幹送変電設備に関するものであるが、需要側の分散電源を利用する方策も考えられている。その一つの方策として、著者は災害時に健全な状態で生き残った既存の配電ネットワークを使用して自立運転を行うことを提案している(10)。これについては次節で少し詳しく紹介したい。もう一つの方策は最も標準的な考え方であると思うが、各消費者単位で自身の家屋等の屋根に設置された太陽光発電装置(以下、PV)を非常用電源として使用する方法である。蓄電池が導入されていれば昼間に蓄えた太陽エネルギーを夜間にも使用できる。この方法の必要性は神戸大学による阪神・淡路大震災の研究(2)において指摘されている。ただし、この方法の問題点は発電装置を所有している人は系統停止時にも電気を利用できるが、所有していない人は

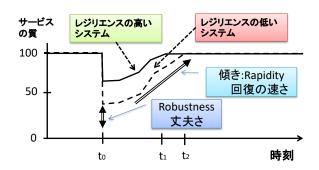
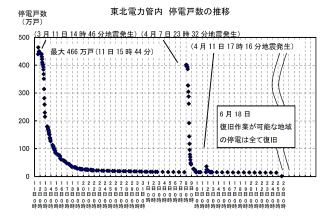
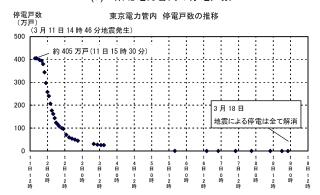


図 3.7.2 レジリエントシステムの応答特性



(a) 東北電力管内の停電戸数



(b) 東京電力管内の停電戸数

図 3.7.3 レジリエントシステムの応答特性

(出典:経済産業省:「原子力安全・保安部会電力安全小委員会電 気設備地震対策ワーキンググループ報告書(案)参考資料」, 2012 年 3月)

レジリエンス の評価項目	東北地方太平洋沖地震			ハリケーン・サン ディ
	東北電力管内		東京電力管内	米国東部
	本震 2011年3月11日 14:46	余震 2011年4月7日 23:32	本震 2011年3月11日 14:46	上陸 2012年10月29日
丈夫さ Robustness	37. 0%	45. 8%	85. 9%	87. 6%
回復の速さ Rapidity	0.31%/時間	1.1%/時間	0. 19%/時間	0.05%/時間

電気を使用できない点である。要するに大災害時の異常事態 に、電気を使用できる人と使用できない人が同じ町内などに 存在し、それが長期間に及ぶと、場合によっては社会的な不 安定を招きかねない点が危惧される。

他に提案されている方策としては、クラスター拡張型グリッドというマイクログリッドに類似した方法がある⁽⁹⁾。この方法では、ある地域に存在する分散電源と電力貯蔵装置および需要の組を、ひとかたまり(クラスターと呼ぶ)とみて、正常時はクラスター間が連系して運転されている。ただし、クラスターが接続している上位系統に事故が発生したときには、各クラスターが自立運転を行うという方法である。この方法は後述する著者の考えている方法とかなり類似したアイデアである。

また分散電源の活用に限定した考え方ではないが、 RESCUE (Resilient Energy System for Continuity in Ultimate Emergency) というコンセプトも横浜国大から提唱されている。このシステムでは、被害の受けにくいエネルギー供給ネットワークの構築、供給力不足時の電力需要の優先度付け、ネットワーク管理者と需要家の行動決定メカニズムなど、災害時のエネルギー供給に適した社会・経済的なルールに重点が置かれている。

(2) 配電ネットワークの非常時自立運転のコンセプト 東日本太平洋沖地震発生後の電力システムでは、主要な大規 模発電所が停止したため、配電設備に大きな被害が出なかっ た地域であっても停電に見舞われた。著者も仙台市において 地震発生から丸二日間ほど停電を経験した。復旧は市内の他 の地域よりも早い方であったと思うが、その二日間、特に夜 間は真っ暗闇の中、早く電気の灯りが欲しいと家族とともに 切望した。そのような中、自宅近くの配電線や電柱は見た目 には壊れたところも無さそうで, このような健全な配電設備 と可制御の分散電源があれば町内の近隣の人々に電灯や暖 房,携帯電話用の電源など,最低限の生活を維持するために 必要な電力を供給できるのではないかと感じた。そしてそれ を実現するための研究を始めなければいけないのではないか と,電力システムを研究する一人として強い使命感を感じた。 この停電の経験が、以下に述べる非常時の電力供給方法を研 究するきっかけになった。

ところで、上述した配電ネットワークの運用は一般に単独 運転と呼ばれ、保守技術者の安全性の観点から電気設備技術 基準の省令により禁止されている。したがって現在の法規制 の下では、以下に紹介する電力供給の方法は実現できない。 しかし、もし非常時に限って単独運転が許されるならば、将 来起こり得る災害発生時に、部分的ではあるかもしれないが 多くの人が電力不足の危機を免れることができるかもしれない。 なお本稿では、通常の単独運転と非常時の単独運転を区 別するため、後者の単独運転を配電ネットワークの自立運転 と呼ぶことにする。

現在,図3.7.4に示す配電ネットワークの自立運転の技術的 実現可能性を検討している。送電網や大規模電源の故障によ り配電ネットワークへの電力供給が停止すると6.6kVの高圧 配電線は無電圧になり、配電線は遮断器と自動区分開閉器により複数の区間に分離される。提案の自立運転は、その配電線の各区間に接続している分散電源を活用して、各区間における分散電源出力と重要負荷の需給平衡および電圧と周波数の品質を保つように自律分散制御を行う方式である。著者は、そのような配電線の区間を「自立運転可能な配電ネットワーク(Islanded Distribution Network, IDN)」と呼び、主に家庭用のPVや燃料電池FC、電気自動車EVなどの交直変換器を介して配電線に連系する分散電源の活用を想定している。

IDN の安定な運用を可能にするため、次の監視・制御技術を開発する必要があると考えている。

- (a) 負荷制御を含むエネルギー管理システム EMS
- (b) 隣接する IDN と無停電で同期連系する技術
- (c) 低消費電力の監視とデータ収集・制御 SCADA
- (d) 自律分散型の保護システム

EMS の目的は IDN 内の重要負荷へできるだけ長く安定に電力を供給することであるので、需給平衡と電力品質を保ちながら分散電源と負荷を統一的に管理・制御する技術が必須となる。無停電同期連系技術は、復旧後の電力システムに配電線が再連系する際や、IDN の安定運用のために複数の IDN を接続または切り離しを柔軟に行うときに必要である。低消費電力 SCADA は、言うまでもなく電力供給力が十分ではない IDN の監視・制御にとって必須であろう。IDN の実現において最も困難な課題と考えられるのは保護システムである。IDN 運用時に発生した事故の検出・除去と復旧の仕方は、現状の配電システムの保護システムと大きく異なるものと考えられる。したがって、新たな開閉機器や保護システムの開発など、コスト面も含めた課題の解決が必要であろう。

これまで、IDN を実現するための技術上の課題の中で、負荷制御と EV バッテリ群による最適需給運用(II)や、単相分散電源群による IDN の電圧制御(I2)について基礎的な研究に取

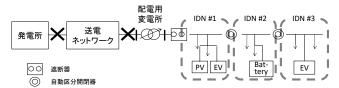


図 3.7.4 緊急時の自立運転配電ネットワークのコンセプト

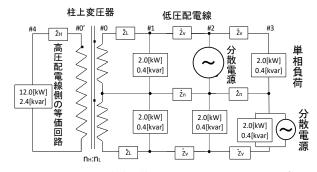


図 3.7.5 不平衡潮流計算法を開発するための IDN モデル

り組んできている。紙面の都合で研究内容の詳細は文献にゆ ずるが、IDN の運用・制御の検討に必須となる不平衡潮流計 算法を,図3.7.5に示した低圧側のみに複数の単相電源が存在 する電力回路を対象に開発中である。

3.7.5 あとがき

種々の技術が進歩しても大規模な自然災害による電力シス テムの被害とそれに伴う停電を皆無にすることは不可能であ ろう。したがって、システムの一部が破壊されても残りの健 全な部分でシステムの機能を維持できる能力、すなわちレジ リエンスを如何に電力システムに埋め込んでいくのかが今後 の重要な技術開発の視点である。文献(13)によると、翼の 一部を失ったジェット戦闘機をパイロットが巧みに操縦して 無事に帰還した出来事が1980年代にあった。そしてその出来 事を皮切りに, 損傷を受けても安定な飛行を可能にするイン テリジェント飛行制御システムの研究が始められたそうであ る。これに照らして考えてみると、災害時に被害を受けずに 生き残った健全な分散電源や電力設備を上手に運用・制御し て停電の被害を最小化する技術の研究開発は、自然災害の多 い我が国にとって大変重要であると言える。

参考文献

- (1) 金山,西川:「阪神・淡路大震災における電力ライフラインの復旧につ いて」, 研究・技術計画学会第 11 回年次学術大会講演要旨集, 2 C11, pp.234-239(1996)
- (2) 大澤:「災害と電力供給システム」, 平成9年度第15回神戸大学工学 部公開講座テキスト, pp.53-62
- (3) 原子力安全・保安部会電力安全小委員会:「電気設備地震対策ワーキン ググループ報告書」(平成24年)
- (4) 豊馬:「電力システムの被害・対応状況とその課題」,電気学会公開シ ンポジウム配付資料(平成23年)
- (5) Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, U.S. Department of Energy, "Comparing the Impacts of Northeast Hurricanes on Energy Infrastructure" (2013)
- (6) 産業構造審議会保安部会電力安全小委員会:「電気設備自然災害等対 策 WG 中間報告書について」(平成 26 年)
- (7) T. D. O'Rourke, "Critical Infrastructure, Interdependencies, and Resilience," The BRIDGE LINKING ENGINEERING AND SOCIETY, Vol. 37, No. 1, pp.22-pp.29 (2007)
- (8) 豊田,白崎,千田:「電力供給システムの弾力性(レジリアンス)に関 する検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-11-134/PSE-11-151, pp.63 - 68 (2011)
- (9) 横山編著:「災害に強い電力ネットワーク スマートグリッドの基礎 知識」、早稲田大学ブックレット「震災後」に考える (2011)
- (10) H. Saitoh, M. Abe, and W. Yashima, "A Proposal of Emergency Microgrid Operation of Distribution Systems after Large Scale Disasters," IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference 2013, pp.152-157 (2013)
- (11) M. Abe and H. Saitoh, "An Optimal Scheduling of Battery Output and Load Control for Loss Minimizing Islanding Operation of Distribution Networks in Emergency," Proceedings of 18th PSCC, ID382, pp.1-7 (2014)
- (12) 石倉, 斎藤: 「緊急時単独運転の配電系統を対象とした不平衡潮流計算 法の基礎検討」、平成26年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集
- (13) S. Massoud Amin and Bruce F. Wollenberg, "Toward a Smart Grid," IEEE Power and Energy Magazine, pp.34-41, Sept./Oct. 2005.