

## 大規模停電の主要因と非常用電源としての太陽光発電システム<sup>1</sup>

### Main causes of large-scale blackouts and photovoltaic systems as emergency power sources

堀内 利一<sup>2</sup> 摂南大学理工学部電気電子工学科  
HORIUCHI, Toshikazu Department of Electrical and Electronic Engineering,  
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

#### Abstract

Our society is vulnerable to power outages because a number of IT equipment such as computers and internet have increased. This paper describes the main mechanisms of large-scale and long-term power outages. Further, the usefulness of photovoltaic power generation system with storage battery as an emergency power source is described.

キーワード: 大停電, ブラックアウト, 送電線, 発電所, 電力系統, 需給バランス, 蓄電池, 太陽光発電

**Keywords** : large scale power outage, blackout, power line, power plant, power system, supply-demand balance, storage battery, solar power

#### 1. はじめに

現在社会は電気エネルギーにより成り立っていると言っても過言ではないほど、あらゆる所で電気が使われている。しかし、絶え間なく電気を供給している電力システムは、縁の下の力持ちのような存在であるので、その運用など知っている人は電気工学を専攻している学生でも稀である。また、最近ではコンピュータなどのIT機器が増えて、インターネットへの依存も高くなり、停電に弱い社会となった。災害などで停電が発生したときには、停電原因や停電対策などが大々的に報道されるが、一時的なものになりがちである。そこで本稿では、大規模停電の主要な発生メカニズムをできるだけわかりやすく解説し、停電が長期間続くと、どのような影響があるのか検討し、最後に非常用電源として蓄電池を備えた太陽光発電システムの有用性について述べる。

<sup>1</sup> 【原稿受付】2019年9月2日, 【掲載決定】2019年12月25日

<sup>2</sup> 【主著者連絡先】堀内 利一 摂南大学, 教授 e-mail: horiuchi@ele.setsunan.ac.jp  
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8, 摂南大学理工学部 電気電子工学科

## 2. 大規模停電の事例

表1に我が国と北米で発生した大規模停電の事例を記す<sup>(1),(2),(3),(4)</sup>。記憶に新しい我が国の大規模停電は、2018年9月6日未明に北海道胆振東部を震源とする地震により北海道全域が停電したブラックアウトである<sup>(5)</sup>。

表1. 過去の大規模停電発生事例

発成年月	発地域	停電規模	停電期間	最初の要因
1965年6月	日本・関西	294万kW	約3時間	台風による送電線事故
1987年7月	日本・首都圏	817万kW(280万戸)	約3時間	電力需要急増
1995年1月	日本・兵庫, 大阪	284万kW(300万世帯)	7日後の復旧率96%	阪神淡路大震災による発電停止, 送電停止
2005年12月	日本・新潟	(65万戸)	31時間	送電線への着雪と強風でのギャロッピング現象による送電停止
2006年8月	日本・首都圏	(139万戸)	4時間	クレーン船による送電線の切断
2011年3月	日本・東北	790万kW(845万世帯)	8日後の復旧率94%	東日本大震災による発電停止, 送電停止
2018年9月	日本・北海道	309万kW(295万戸)	45時間	北海道胆振東部地震による発電停止, 送電停止
1965年11月	アメリカ・北東部	2000万kW	13時間	保護継電器の作動, 送電線停止
2003年8月	アメリカ・北東部	6180万kW	43時間	樹木接触による保護継電器の作動, 送電線停止
1996年8月	アメリカ・西海岸	2800万kW	9時間	樹木接触による保護継電器の作動, 送電線停止
1989年3月	カナダ・ケベック州	(約600万世帯)	9時間	大規模な太陽フレアに起因する地上での磁気嵐と送電停止

海外では、ブラックアウト(Blackout)という単語は、通常の停電も含めて消灯や灯火管制、意識喪失など広い意味で用いられている。我が国では、北海道全域が停電になったインパクトが強かったためか、マスコミや電力エネルギー分野の研究者がブラックアウトを連呼し、資源エネルギー庁のホームページでは、「“ブラックアウト”とは、大手電力会社の管轄する地域のすべてで停電が起こる現象（全域停電）のことを意味します。」と明記している<sup>(6)</sup>。英語本来の意味から少しずれている状況は好ましいことではないが、後述するように相当深刻な事態であるので、全域停電を分かりやすく表すブラックアウトという表現を本稿でも使用する。ただし、大規模停電のうち全域停電となるのが、ブラックアウトであって、表1の大規模停電全てがブラックアウトしたわけではない。

停電規模を表すには、停電により需要家（電気の消費者）へ届けることができなくなった供給支障電力(kW)と、停電時間、停電した戸数や軒数、世帯数などが用いられる。停電時間については、表1のように概ね復旧するまでの時間を用いる場合が多いが、復旧率から定義した時間を用いる場合もある。

先述の北海道ブラックアウトでは、供給支障電力約309万kW、停電時間約45時間、停電戸数約295万戸である。米国ではこれを遥かに凌ぐ規模の大規模停電が繰り返し発生

している。様々な規模の停電のなかから、100万kWを超える停電について考察していく。

### 3. 交流送電と発電機の同期運転

大規模停電を考察するためには、交流送電と発電機の同期運転について知る必要がある。電力システムでは多数の発電機が送電網（複数の送電線からなる送電ネットワーク）につながり、一斉に電気を供給しているが、交流の電気は図1のようにプラスとマイナスが一定周期ごとに入れ替わっているため、このタイミングを合わせる必要がある。

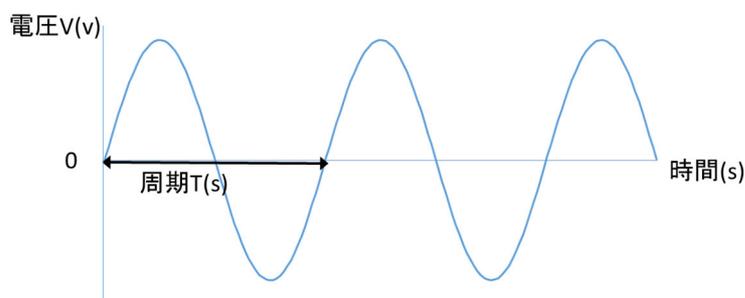


図1. 交流の波形と周期

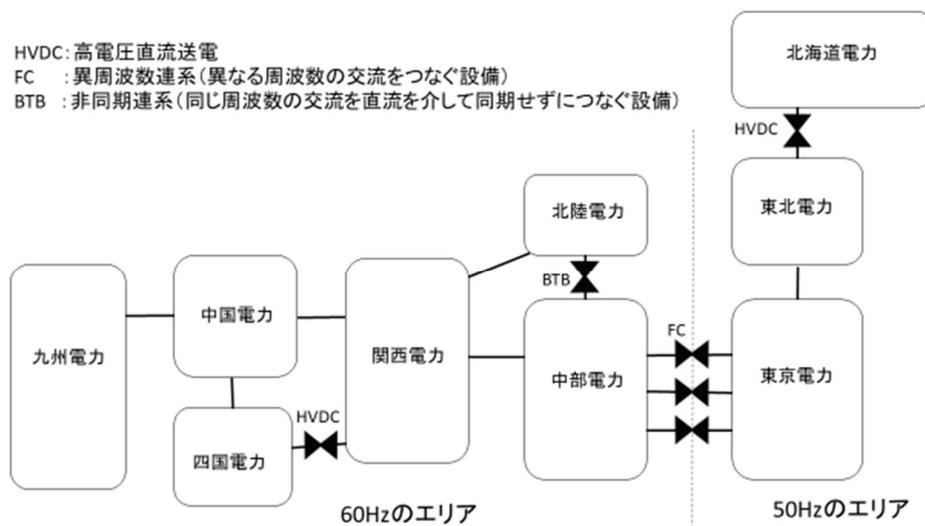


図2. 我が国の電力会社間の系統連系

このタイミングを合わせることを位相合わせや同期と呼んでおり、発電所では、同期運転ができる同期発電機という種類の発電機で電気をつくっている。図1で周期Tは、交流の1周期分を時間で表したものであるが、角度でも表すことができる。ちょうど1周期が360度となる。また、周波数 $f(\text{Hz})$ は、周期 $T(\text{s})$ の逆数であり、 $f=1/T$ の関係となる。

図2は、我が国の主要な電力会社どうしのつながりを示している。単独である沖縄電力は図において省略している。周波数は、関西電力など西地域は60Hz、東京電力など東地域は50Hzであり、西地域では1秒間に60回、東地域では1秒間に50回、この周期が繰り返されている。

また、発電、変電、送電、配電を含めた電力システムのことを電力系統と呼び、送電網をつなぐことを系統連系と言う。同じ周波数で系統連系されたエリアの発電機は、全て位相を合わせた同期運転をしている。

#### 4. 周波数の変動と制御

電力の需給バランスが崩れると、一定であるはずの電圧や周波数が変化する。需給バランスとは、需要と供給のバランスであり、消費電力が需要、発電電力が供給である。

例えば、発電所で事故が発生して発電電力が低下したときは、供給力不足となり、電圧や周波数は低下する。また、平常時でも消費電力が急に増加し、発電電力が追い付かない場合も供給力不足で電圧や周波数は低下する。しかし、このような変動を制御し抑制するために発電機の出力調整や予備力の確保、揚水発電所の緊急起動など様々な対策がとられており、災害や事故に対して強固なシステムを構築しているので、普段はあまり電圧や周波数の変動が発生しない<sup>(7)</sup>。普段は、発電所でガバナ制御と呼ばれる速度制御装置により、水力では水車に入る水量を調整し、火力では蒸気タービンに入る蒸気量を調整して、発電機の回転速度を一定に保ち、周波数を一定にしている。さらに、自動電圧調整装置により、発電機の界磁巻線に供給する励磁電流を制御し、電圧も一定に保っている。(励磁電流を制御することで発電機内部の磁力の強さを調整し、発電機の出力電圧を一定にしている。)

また、図2のように電力会社間を系統連系させることで、事故時に他の電力会社から電力融通を受けることができるので供給信頼度が向上する。関西電力など西地域の周波数は、 $60\text{Hz} \pm 0.1\text{Hz}$ 、最大でも $60\text{Hz} \pm 0.2\text{Hz}$ の僅かな変動範囲内で管理、運用されている。

ここで、周波数が変動するのは、事故などが生じた一部の区画だけでなく、同じ周波数で連系されているエリアは、全て一斉に周波数変動するということを理解しておく必要がある。例えば、60Hzで連系している関西電力と中部、北陸、中国、四国、九州電力は一斉に同じように周波数変動するのである。

電力設備に事故が発生すると、いくら対策をとっていても管理範囲を逸脱する異常事態は起こり得る。そういった緊急時についても制御するための手段が予め決められている。万が一、電力系統の周波数が管理範囲を逸脱して低下していくときには、負荷制限がかけられる。これは、供給エリア内の需要家を地域別や重要度別に分け、緊急時に一部需要家への電力供給を強制的に停止する方法である。逆に周波数が管理範囲を超えて上昇していくときには電源制限がかかる。これは一部の発電機を緊急に遮断停止する方法である<sup>(7)</sup>。

負荷制限は、周波数低下をくい止めるため即座に実施されるが、予め需給バランスを予測して供給力不足が危惧される場合、大規模停電を避けるために計画的に電力供給停止エ

リアを順次変えていく輪番停電（計画停電）が実施されることがある。2011年3月の東日本大震災により、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所などからの電力供給を断たれた東京電力管内で実施されたのが、この輪番停電である。

以上のような対策をとってさえ防ぐことができないのが、先述のブラックアウトである。次章では、このような大規模停電の発生メカニズムについて述べる。

## 5. 大規模停電が発生するメカニズム

小さな事故が大停電に拡大していくメカニズムは、米国で発生した事例がわかりやすい。ニューヨークやシカゴなど大都市がある北東部では度々、大規模な停電が発生しており、表1に示すように2003年には供給支障電力6,180万kW、停電時間約43時間という途轍もない規模となったが、事の発端は電力会社の制御所の監視システム不具合と送電線への樹木接触という出来事であった。米国西部においても1996年に供給支障電力2,800万kW、停電時間約9時間の大規模停電が発生し、その発端も送電線への樹木接触である。送電線に流れる電流が増えると、電線が温度上昇して伸び、送電鉄塔間で電線のたるみが大きくなって樹木接触しやすくなるのである。樹木接触で送電線事故が生じると、その区間を守備している保護継電器と電流遮断器により、他に影響を及ぼさないよう、故障箇所を含む最小区間が自動的に素早く切り離される。この保護継電システムが働くと、切り離された区間を経由して送られていた電気の流れ（電力潮流と呼ぶ）が近隣の他の送電ルートに迂回して流れ込むことになる。送電網に迂回してきた電力潮流を受け入れる余裕があれば、何の問題も起こらず、故障除去が成功する。しかし、米国北東部の五大湖周辺は大電力消費地が数多く点在し、普段からいずれの送電ルートにも余裕がない状態で運用されていた。そうすると、迂回してきた電力潮流により、送電線が過負荷となって保護停止し、その停止区間を経て流れていた電力潮流も別のルートへと迂回し、次々とドミノ倒しのように送電網が停止していく。こうなると電力系統が動揺し、周波数や電圧が大きく変動するため、この系統につながった発電機が同期運転を継続できず、また、つながったままでは発電機が壊れてしまう恐れがあるので、電力系統から解列する。（同期運転していた状態から電氣的に切り離されることを解列という。）

需給バランスでいうと、発電機の解列で供給力が不足していくので、周波数が低下していく。この周波数低下に伴い、他の発電機も次々と連鎖的に解列し、系統につながった発電機全てが電気を供給できない状態になるため、大規模停電になるのである。

我が国に話を戻すと、昔、水力が主であった1965年に御母衣水力発電所からの送電線が台風による豪雨と落石の影響で鉄塔倒壊し、これにより他の送電線の停止や発電所の解列が連鎖的に発生し、関西圏で供給支障電力294万kW、停電時間約3時間の大規模停電が発生している<sup>(3)</sup>。

最近発生した北海道ブラックアウトでは、直下型の大地震により苫東厚真火力発電所の2号発電機と4号発電機が停止し、計116万kWの発電電力が失われたため、需給バランスが崩れ、周波数が低下した。これを検出したAFC（自動周波数制御装置）により、図2で北海道と本州を結ぶ高電圧直流連系線（北本直流連系線）から緊急受電するが、なお周

波数が低下し、50Hz から 1Hz 以上低下して 48.5Hz になった時点と 48.0Hz になった時点の 2 回にわたり負荷制限がかけられて、計 130 万 kW 分の負荷を切り離れた。他の小規模な風力発電所や水力発電所も解列し、46.13Hz まで低下した後、負荷制限の効果と北本直流連系線からの電力供給で 50Hz に一旦回復して、需給バランスがとられた。需給がバランスして安定しかけたものの、これがすぐに崩れる。寝静まっていた午前 3 時頃の大地震ということであり、就寝していた人々が次々起き出して電灯やテレビなどを点け始めたのである。これで電力需要が急増した。北本直流連系線からの最大電力 60 万 kW と、苫東厚真火力発電所 1 号発電機など電力供給を続けていた発電機の出力量増加で、急増した需要にバランスをとるためのせめぎ合いが約 15 分間あった後、頼みの綱の苫東厚真 1 号発電機が不調となり、供給力不足で再び周波数が低下していった。ここでも負荷制限が再度かけられたが、1 号発電機が完全に停止してしまい、周波数低下が一気に加速して 45Hz 以下にまで低下、北海道電力の系統に残って電力供給していた全ての発電機が解列し、北本直流連系線からの電力供給も停止、北海道全域が停電しブラックアウトとなったのである<sup>(5),(6)</sup>。

以上のように、設備事故等何らかの原因で電力の需給バランスが崩れて電力系統が動揺し、周波数や電圧が変動し、同期運転を継続することができなくなった発電機が電力系統から解列していき、供給力が低下して周波数が低下し、連鎖的に次々と発電機が解列していくというのが大規模停電発生メカニズムの基本である。もちろん、これ以外の原因で大規模停電になった事例もある。例えば、表 1 で 1987 年 7 月 23 日に東京首都圏で発生した供給支障電力 817 万 kW、停電時間約 3 時間の大規模停電では、オフィスの昼休み時間帯後にエアコン需要が急増して、電力系統の電圧が低下したことが発端となっている。需給バランスが崩れたのは同様であるが、このときは、有効電力よりも無効電力のアンバランスが主な原因になっている。（電力は複素数で表され、実数部分が有効電力、虚数部分が無効電力である。）

当時急速に普及したインバータエアコンは、有効電力だけでなく無効電力も多く消費する。巨大都市で、暑い日の昼休み時間終了直後に一斉にインバータエアコンをつけたため、短時間に無効電力消費が急増した。無効電力は電力系統の電圧変動に影響するため、無効電力が不足すると電圧が低下する。（一方、有効電力の変動は主に電力系統の周波数変動に影響する。）電力会社は、変電所に設置している電力用コンデンサ設備（無効電力不足を補うための設備）を順次投入してアンバランスを解消しようとしたが、全量投入しても無効電力供給量が足りずに電圧崩壊現象が生じ、大規模停電に陥ったのである。

地震や台風以外の自然現象によるものとしては、表 1 に記した 1989 年にカナダ・ケベック州で発生した大規模停電が特異な例としてあげられる。非常に規模の大きい太陽フレア発生とともに太陽風である高エネルギープラズマ粒子の流れが地球の方向に放出され、地球磁気圏の磁力線に沿って高緯度地方へと流れ込み、オーロラ発生と同時に規模の大きな磁気嵐を引き起こした。これにより、送配電線、通信線などに誘導起電力が重畳したことで過電圧となって、広範囲にわたって送配電網や通信網が停止した。太陽フレアやコロナ質量放出(CME)の規模や放出方向、将来の地球磁気圏の状態によっては、高緯度地方に

限らず、我が国が位置する中緯度地方においても同様な現象の発生が考えられる。

次章では、関西圏においてブラックアウトが発生する可能性について検討する。

## 6. 関西圏で大規模停電が発生する可能性

関西においても台風や設備事故などによる大停電が、しばしば発生しているが、この章では、先述した北海道ブラックアウトのように関西全域が長時間停電してしまう可能性を考える。北海道ブラックアウトの直後、北海道は本州と送電設備容量 60 万 kW の北本直流連系線でつながっているだけであるので、他電力からの応援が十分受けられなかったという理由があげられた。(ブラックアウトの後、北海道と本州間は新たに 30 万 kW の連系設備が 2019 年 3 月に運用開始している。)

これに対して関西圏は、図 2 のように 60Hz のエリアの電力会社どうしが交流の連系線で直接つながっているため、十分な応援が受けられ、また、発電所も 1 カ所に片寄っていないので、直下型地震程度では北海道ブラックアウトのような事態にはなり難い。では、他にどのような要因があるのか。人為的な要因と自然災害による要因を分け、先ず人為的な要因を考慮すると、その一つに地政学的リスクがあげられる。特定地域において、政治的、軍事的、社会的な緊張の高まりが、地域や世界全体の経済活動などの先行きを不安にすることであるが、石油や天然ガスなどの資源は特定の地域に偏っている。我が国は、海外からタンカーによる海上輸送で大量の化石燃料を輸入しており、安定供給を確保するため、1984 年より「石油の備蓄の確保等に関する法律」が施行され国内での国家備蓄や民間備蓄が実施されている。しかし、海上輸送ルートであるシーレーンが長期間閉ざされた場合、火力発電は燃料不足に陥る。また昨今、極東地域は軍事バランスの変化とともに緊張が高まっており、我が国を含む地域的な紛争が偶発的に発生し、報復合戦となった場合は、軍事基地や空港と同様、発電所や変電所が重要な攻撃目標になる。また、弾道ミサイル等で核を都市部上空 40km 以上の高々度で爆発させ、直接的に人を殺傷せず、電力をはじめとする都市機能を麻痺させる電磁パルス攻撃も我が国の防衛白書で想定され、内閣官房を中心として防衛省、経済産業省、国土交通省などで対策を検討している<sup>(8)</sup>。ただし、これらは関西圏に限らない事象である。

次に、自然災害の内、関西圏に影響を及ぼす可能性の高い海溝型地震について検討する。関西圏を含む 60Hz のエリアは、若狭湾の原子力発電所があまり稼働していないこともあり、太平洋側に点在する火力発電所への依存率が高くなっている。関西電力では、11 カ所の火力発電所のうち、9 カ所が大阪湾や瀬戸内海、太平洋沿岸に位置している。中部電力のエリアでは、中部電力と東京電力の共同発電会社 JERA の 11 カ所の火力発電所のうち、10 カ所が太平洋沿岸に位置している。そして、太平洋側の広範囲にわたり強い地震動と津波を生じさせる海溝型地震である南海トラフ地震の切迫性が危惧されている。

地震や津波が発生した場合、火力発電所はどのようなのかという質問に対して、関西電力は、回答をホームページに掲載しており、また、南海トラフ地震を想定した防災業務計画を 2018 年 6 月に策定し、一般に公開している<sup>(9)</sup>。地震の振動や地盤沈下などに対しては、火力発電所の地盤改良やフレキシブル配管や配線などで対策しているとのことである。

り、津波被害も瀬戸内海の一部発電所については軽微と予想されるとのことであるが、停止した発電所の早期運転再開に力を入れるようである。火力発電所が立地する沿岸地域については、東日本大震災時に発生したように津波による燃料タンクやオイル、ガスボンベ等の流出と出火、破壊され流出した瓦礫の火災も想定する必要がある。

国の中央防災会議防災対策推進検討会議の南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループの報告書では、発電設備の被災により西日本全体の供給能力が電力需要の5割程度となり、需給バランスが不安定になることから、広域的に停電が発生し、近畿三府県（和歌山、大阪、兵庫）で約9割、東海三県（静岡、愛知、三重）で約9割、山陽三県（岡山、広島、山口）で約3～7割、四国全体（愛媛、香川、高知、徳島）で約9割、九州二県（大分、宮崎）で約9割停電すると想定している<sup>(10)</sup>。

国の想定では、近畿三府県の約9割の需要家は停電するとしているが、先述の大規模停電発生メカニズムのように、60Hzの電力系統に繋がった発電機群が同期運転できなくなることと、広範囲かつ大きな地震動で、発電機群や発電所の変圧器群も一斉に保護停止し、鉄塔や電柱などの送配電設備も大きなダメージを受けることから、近畿三府県の約1割の需要家だけが停電せずに済むという事は考え難い。関西圏はブラックアウトすると考えて妥当であると思われる。

ここで、太平洋沿岸や大阪湾などの火力発電所群が大地震により一斉に停止し、需給バランスが崩れた場合を想定する。60Hzエリア内で停止せずに電力供給を続けている発電所は発電出力を急遽増加させ、また、揚水発電所の緊急起動がなされる。さらに、東京電力など50Hzのエリアがあまり影響を受けていない場合は、佐久間・新信濃・東清水の3カ所に設けられている周波数変換所を通じて緊急の電力融通がなされ、需給バランスを回復させる試みがなされる。3カ所の周波数変換所からの供給力の合計は最大120万kWである。一方、関西電力管内だけで電力需要は2000万kWを超えている時が多い。

供給力が足りず、周波数が60Hzから0.5Hz程度低下し、約59.5Hzになった時点で負荷制限が段階的にかけられる。しかし、供給力が大幅に足りず周波数低下が急であれば、先述した通り、60Hzのエリア全域で同時に周波数が低下するため、共倒れを防がねばならない。このための手段が予め準備されており、60Hzから1Hz低下して59Hzになった時点で四国電力と九州電力が60Hzの連系線から電氣的に切り離され、さらに60Hzから1.5Hz低下して58.5Hzになった時点で、関西電力と中部電力、北陸電力、中国電力を結ぶ連系線が切り離される。もし、この状態になれば、関西電力は他電力会社との交流の連系線を通じて電力融通を受けることも、周波数変換所経由で50Hzエリアから電力融通を受けることもできない。いわゆるブラックアウト寸前の状況にあるといえる。ただし、関西電力と四国電力とを結んでいる図2の紀伊水道高電圧直流連系設備である阿南紀北直流幹線（送電容量140万kW）に被害がなければ、四国の瀬戸内海沿岸や橘湾の発電所などから電力融通を受けられる可能性は残されている。この直流連系設備には、関西圏の命綱としての役割という側面も持たされている。

そして、ごく短時間で関西電力管内の発電設備が再起動に成功するなど需給バランスが回復し、周波数が元に戻っていけば、再度、他社との連系線も含めて復旧していく。し

かし、そうでない場合、被害を受けずに電力供給を続けている火力発電所も約 57.5Hz で同期運転が限界であり、これを下回ると電力系統から解列し、電力供給できなくなる。先述のように、周波数が大幅低下すると、電力系統につながったままでは発電機の軸振動や励磁系の過励磁により機械的に破損する恐れがあるため、これを防ぐため解列するのである。水力発電所は約 57Hz が限界であり、これを下回ると、ほぼすべての発電所からの供給力が途絶えることになり、関西圏はブラックアウトに陥り、全域が停電する。

ブラックアウトからの復旧は、起点となる水力発電所と小規模な需要地で需給バランスをとった後に、そこからの電気を種火として他の発電所を順に電力系統と同期連系させて電力供給エリアを徐々に広げていくことになる。この復旧期間は、設備の被害状況に左右されるが、被災地域が関西、中部、四国など広範囲であれば、被災していない他地域からの応援が少なく、また応援部隊が分散してしまうので、完全復旧にかなりの期間を要することになる。

## 7. 大規模停電が続いた場合の非常用電源

ブラックアウトが短時間で復旧せず、数日から1週間程度、あるいはそれ以上の期間続いた場合、多くの人々にとって想定外の出来事となるだろう。人々は何が起こったのか情報を得ようとし、家族や知人と連絡を取り合おうとするが、テレビやインターネット回線は停電で利用できず、スマートフォンや携帯電話は、みな一斉に使用するため、通信トラフィックが劇的に増加して、なかなか繋がらない。そうこうするうち、電波塔や中継局の非常用バッテリーが切れて電波が出なくなり、全く繋がらなくなる。国の南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループの報告書では、被災直後に固定電話最大約 930 万回線が通話できなくなり、東海三県で約 9 割、近畿三府県で約 9 割、山陽三県で約 3~6 割、四国で約 9 割、九州二県で約 9 割の通話支障を想定している<sup>(11)</sup>。インターネットを用いた安否確認システムも役立たない。生き残った固定電話についても、光回線やネット回線を使用する IP 電話や多機能電話は使えず、昔ながらの単機能な電話機や黒電話、公衆電話が停電時に使用可能な手段として残っているが、どこにあるのか分かる人はまずいない。

地区で決められた指定避難所に向かおうとして外に出れば、ほぼ全ての信号機が消え、大きな交差点で警察官が手信号で交通整理をしている。建物倒壊や陥没、土砂崩れなども多数発生し、あちこちで大渋滞や事故が起き、火災（地震による火災、停電時はロウソク火災、停電後の通電による通電火災）も発生し、緊急車両が走り回っているが対応が追い付かない。鉄道の踏切が停電時には安全確保のため、遮断機が閉まったままになり、渡ることができない。電車の位置情報が確認できず、いつ再送電されて電車が動き出すのかわからないので、閉まった遮断機を開ける判断ができないからである。関西圏にある数千箇所の踏切が開かずの踏切になってしまい、交通を妨げることになる。停電から少し間をおいて、水道や都市ガスも止まってしまう。大規模停電で停止するものを表 2 に示す

(10),(11),(12),(13),(14),(15)。

表 2. 大規模停電で停止するもの

	大規模停電発生とともにすぐに停止するもの	しばらく動いているが、やがて停止するもの
公共インフラ	街路灯, 交通信号, 電鉄, 地下鉄, ガソリンスタンド, インターネット回線, WiFi, 鉄道踏切の遮断機(停電時に閉まるので通行不可), ATM, 電子マネーやクレジットカード, レジ, 銀行や証券などの金融	水道, 都市ガス, 停電地域にある放送局や電波塔, 携帯電話基地局, 高速道路のETCや電光掲示板, 防災無線, 地域の有線放送, 空港, 郵便や宅配など
一般家庭	照明器具, テレビ, デスクトップパソコン, IP電話, エアコン, 扇風機, 冷蔵庫, 換気扇, ファンヒーター, 電子レンジ, オープン, IHクッキングヒーターなど	水道, 水洗トイレ, シャワー, 蓄電機能付きの照明器具, ガス器具, スマートフォン, 携帯電話, ノートパソコン, タブレット端末など
その他	エレベータ, エスカレータ, 自動ドア, 電気錠, 電動シャッター, 工作機械, 電動リフト, 電動クレーン, 立体駐車場など	人工呼吸器, 人工透析器, 人工心臓などの医療機器, 蓄電装置付きエレベータなど

電池式のラジオが災害時に役立つことを思い出して、ラジオの周波数を変えていくと、かろうじて非常用電源が整った僅かな数の放送波から小さな音で入ってくる。混乱の中、停電地域の地方局からは断片的な地域情報がほとんどで、総合的な情報を得るには、遙か遠方、停電地域外にある東京キー局からの電波が届くことを期待するしかない。膨大な数のエレベータや自動ドア、電気錠が一斉に停止し、多くの人々が閉じ込められて救援を待っている。国の想定では、京阪神や中京地域を中心に最大 23,000 人のエレベータ閉じ込めが発生するとしている<sup>(11)</sup>。電車や地下鉄も一斉に停止し、蓄電機能の付いていない電車に閉じ込められた人は線路を徒歩で避難しなければならない。高速道路は閉鎖され、一般道路も大渋滞で他の地域へ逃がれることもままならない。空港では地震発生前に到着した大勢の人々が行き場を失って大混雑となる。そして人工島である関西国際空港は、津波被害が発生すると想定されており<sup>(12)</sup>、そのための対策が実施されているようである。

ガソリンスタンドの給油ポンプも止まり、緊急車両への手動での給油以外は営業できないので、車もやがて使えなくなる。交通機関として残されたバスやトラックも燃料が入手困難になるので、一部を除き、人や物資の流通がほぼ停止状態になる。広範囲に流通が止まるので、水や食料、薬品、消耗品などの入手が困難となり、自治体等からの配給や備蓄品に頼ることになる。しかし、高層マンション近くの指定避難所では人が溢れ、マンション住民が入れないケースも多発し、避難所に配給や備蓄品を求めて人が殺到した場合、流通が滞っている状況では、すぐ底をつくことになる。

ATM や銀行、証券業務など金融も止まり、経済活動も停止、電子マネーはもとより、通貨への信任が薄らぐと、現金払いも拒否されるようになっていくと考えられる。

停電発生時刻が勤務時間帯であれば、多く帰宅困難者が発生する。(国の想定では、京阪神都市圏で約 660 万人、中京都市圏で約 400 万人<sup>(13)</sup>) 通勤経路途中で近隣の避難所へたどり着こうにもスマートフォンの地図ナビゲーションが利用できず、口コミや貼り紙でしか情報を得ることができない。予めダウンロードしておいた電子地図や紙の地図を準備

している用意周到な人はそういない。

停電に対する弱者である人工呼吸器や人工透析器が必要な人とその家族は、家庭に備え付けられた非常用バッテリーの残量を気に留めながら停電対策のとられた病院や電力会社の電源車が来ている避難所などへ避難しようとする。その他多くの人は、いつ届くかわからない電波をあてにして、家族に連絡しなければと模索し、スマートフォンや携帯電話が充電できる所がないかと避難所や近隣地区を探し回る。車に燃料が残っていれば、車で充電できるが、それらも程なくして空になってしまう。巨大地震発生後は、余震も相当な数発生し、人々は不安に駆られる。ブラックアウトが続くと正確な情報が得られず、デマや流言が飛び交い混乱状態が拡大していくと思われる。

このような混乱状態を緩和させ、また、電気がないと命にかかわる人にとっての生命線となるのが、非常用電源である。蓄電池とインバータを用いたものやエンジン発電機を用いたものなど様々な非常用電源装置が市販されており、今日、大規模なオフィスビルやショッピングモール、ホテル、劇場、地下街など不特定多数の人が利用する場所には、消火設備や排煙装置、避難用照明、避難表示などの防災設備の設置とともに防災用自家発電装置の設置が義務付けられている。また、工場やスーパー、商店、コンビニエンスストア、ハウス栽培農家、畜産、養殖、養魚業、病院などに対し、一般非常用自家発電装置の設置が勧められており、コンピュータを使用する需要家へは無停電電源装置の設置が勧められている。これら非常用電源装置の稼働可能時間は、蓄電池容量や燃料の容量によるが、数時間から数十時間程度である。

数日間の停電対策には、BCP 対応 (Business Continuity Plan : 事業継続計画) を目的とした一般非常用自家発電装置が市販されており、最長 1 週間の停電に対応可能である。ただ、大規模な非常用電源設備は、高コストな導入費用、設置スペース、燃料備蓄や保守などのハードルが高く、どこにでも容易に設置できるわけではない。小規模な非常用電源設備では、長くとも数十時間程度で燃料切れ、あるいはバッテリー切れになるので、燃料や電気の補充が必要になる。しかし、先述したように物資の流通が止まっている状況での補充は困難を極める。

このため、近年、非常用電源として太陽光発電と蓄電池を備えた指定避難所が開設され始めている<sup>(16)</sup>。このシステムでは、日照があれば発電し、避難所の限定された負荷へ電力供給を続けることができる。次に、このような避難所のシステムについて検討する。

## 8. 非常用電源としての太陽光発電システム

太陽光発電システムには、電力会社の配電線と連系する系統連系型、連系せずに常時独立した形で使用する独立型、平常時は電力会社の配電線と連系しているが、災害などで停電になった時には、連系箇所をブレーカーなどで電氣的に切り離し、独立した形で使用する防災対応型システムに分けられる。独立型や防災対応型のシステムには蓄電池が備わっており、雨天や夜間でも電力供給が可能である。一方、今日主流である住宅用太陽光発電は、系統連系型で蓄電池が無いものがほとんどであるので、停電時は晴天の昼間しか役立たない。

図3に東日本大震災後、東北地方の指定避難所である学校に設置されている防災対応型システムを示す<sup>(16)</sup>。関西においても指定避難所へ同様なシステムの設置が進められている。図において交流の配線がAC、直流がDCであり、ACは複数の導線を1本の線で記し、DCは2本の線で表している。校舎屋上に10kWの太陽電池アレイ（太陽光パネル）が設置され、蓄電容量15kWhのリチウムイオン蓄電池が体育館内の専用区画に設置され、常に満充電状態に保たれている。晴天日の日中は、自家消費する以上の太陽光発電電力を電力会社へ送り、夜間などは電力会社から受電しており、災害などで停電した時は電力会社と切り離し、独立した非常用電源として機能するようになっている。

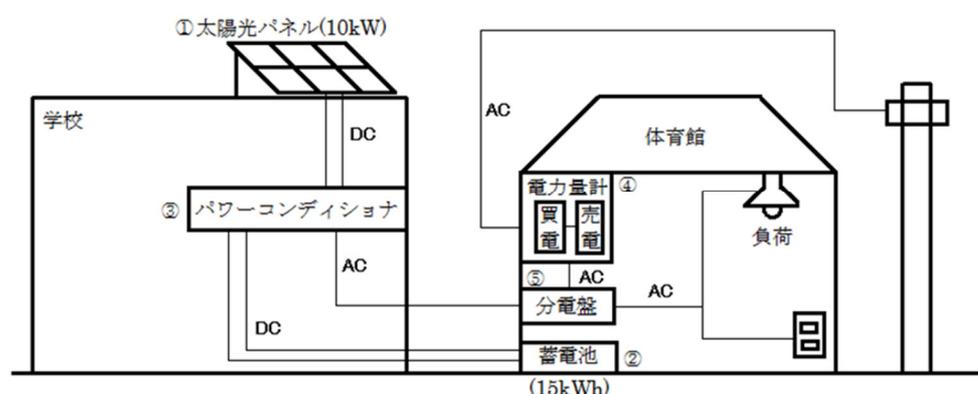


図3. 指定避難所の学校に設置されている防災対応型太陽光発電システム例

このような非常用電源であれば、比較的、設置コストを抑えることができ、また、燃料供給が不要でもあることから、災害時に大いに役立つ。避難所で使う消費電力が一定以下であれば、太陽光発電だけで永続的に電気を供給し続けることも可能になる。ただし、このような防災対応型システムの点検は、定められた年数ごとの定期点検だけであり、長期的な運用については、停電を伴う災害時にしか稼働させないので、災害時にはぶっつけ本番となってしまう。

長期運用に際して、十分な検証が必要であると考えられる。本学理工学部電気電子工学科では、非常用電源としての太陽光発電システムが、どの程度の期間、安定運用を継続できるか評価研究するため、実際の避難所のシステムを1/15の容量に縮小した太陽電池アレイ、充電コントローラ、深放電可能な蓄電池、電子負荷装置からなる実験設備を用いて様々な条件を想定し、運用実験を繰り返し実施している<sup>(17)</sup>。

停電時に自治体が想定している避難所内で限定的に使用される電気機器とその機器の1日あたりの使用時間、各機器1台当たりの消費電力概算値を表3に示す。消費電力については、同等製品から求めた概算値としている。これらの負荷は配電線の停電が続いている間、非常用電源から電力供給を受け続けることになる。

避難所での使用が想定される機器のなかに消費電力が大きいエアコンなどは含まれていない。夏季は大型扇風機で涼をとり、冬季は電気が不要な暖房器具で暖をとる。冷蔵庫や

スポットクーラー，洗濯機，ヘアードライヤーなども使用しない．さらに，体育館や教室の天井照明器具も使用せず，昼間や夜間は消灯し，暗くなる時間帯だけ別置きの LED 灯光器と防災系高所照明だけを点灯する．自治体の想定に少し無理があると思われるが，消費電力の大きい機器は一切使わずに極力節電して凌ぐ事が前提となっている．

表 3. 電力系統停電時，避難所の非常用電源で限定的に使用される電気機器

電気機器	数量	1台当たりの消費電力	1日当たりの使用時間
防災用無線	1	30W	連続24時間
大画面液晶テレビ	1	150W	連続24時間(災害報道等の電波が入る場合)
LED灯光器	2	20W	6時間(朝夕の暗い時のみ使用想定)
防災系高所照明	2	150W	6時間(朝夕の暗い時のみ使用想定)
大型扇風機	3	100W	6時間(暑い時間帯のみ使用想定)
携帯電話等の充電	50	10W	1台あたり2時間(複数タップの交代使用を想定)

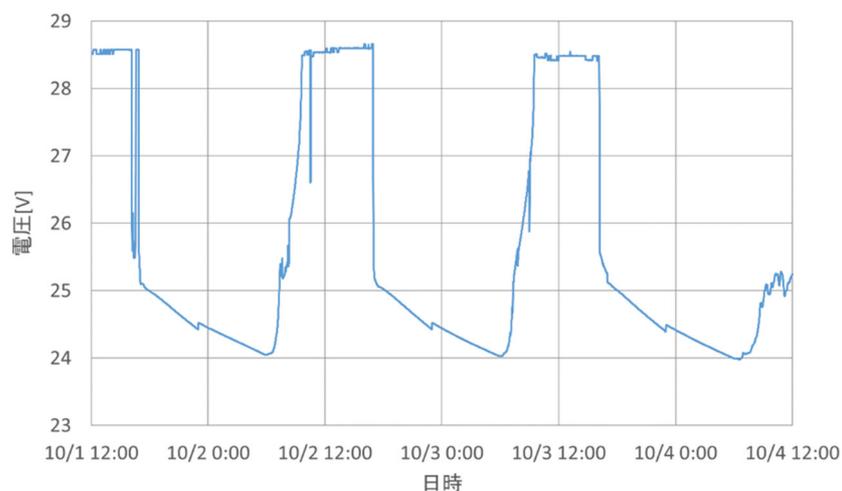


図 4. 防災用太陽光発電システム蓄電電圧の時間的推移

このように想定された負荷を総合し，その容量の 1/15 での日負荷曲線（1日の消費電力の時間推移を表す曲線）のデータを電子負荷装置にインプットして電力消費させ，非常用電源を継続運転した場合の蓄電池電圧の時間的推移を図 4 に示す<sup>(17)</sup>．

実験に使用した蓄電池電圧については，実システムが直流 100V 系であるのに対して，実験している学生の安全面や電気関係の法令を考慮して直流 24V 系としている．図 4 では晴天続きの 3 日間であり，日中に満充電電圧 28.5V に達し，過充電抑制制御がかかっている．日没後に電力消費と共に急に電圧が低くなっていき，翌日の日の出直前に最低電圧になり，日の出とともに太陽光発電からの電力供給を得て電圧が回復している様子がわかる．このような一定の充放電サイクルが続けば，長期間の継続運転が可能である．

しかし、晴天が続くとは限らない。曇天や雨天時についての実験では、節電を前提とした軽負荷であるにもかかわらず、継続運転可能な期間が3日未満になることがあった。日没後に蓄電池電圧が極端に低下して非常用電源が停止した場合は、翌日、晴天であれば復旧するが、電力供給が断続的になってしまう。このため、曇天や雨天続きでも負荷をさらに絞り、どの程度の期間、連続運転できるのかについて、また、負荷を絞らずに発電容量、蓄電容量を増した場合の最適需給バランスに関して、実験及び過去の日射量データをもとにしたシミュレーションによる評価を実施している。

## 9. まとめ

本稿では、大規模停電の主要な発生メカニズムを過去に発生した事例により解説し、停電が長期間続くとどのような影響があるのかを説明した。大規模停電が長期間続く場合、非常用電源として、蓄電池を備えた太陽光発電システムの有用性について述べ、理工学部電気電子工学科で実施しているこのシステムに関する検証実験について紹介した。

## 参考文献

- (1) 山家公雄, 「北米大停電」, 日本電気協会新聞部, (2004) pp.27-74.
- (2) 電気学会 系統脱調・事故波及防止リレー技術調査専門委員会, 「系統脱調・事故波及防止リレー技術」, 電気学会技術報告書 No.801(2000), pp.4-174.
- (3) 横山明彦, 「欧米大停電から何を学ぶか」, 電学誌 125-1(2005), pp.29-32.
- (4) 電力中央研究所, 「大停電, 日本は大丈夫か 北米大停電最終報告書を踏まえて」, (2004) <https://criepi.denken.or.jp/koko/powerline/data/final.pdf> (2019年7月19日閲覧).
- (5) 平成30年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会, 「平成30年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会最終報告」, (2018) pp.1-129.
- (6) 「日本初の“ブラックアウト”, その時一体何が起きたのか」, 資源エネルギー庁ホームページ, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/blackout.html> (2019年7月19日閲覧).
- (7) 電気学会電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御調査専門委員会, 「電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御」, 電気学会技術報告書 No.869(2002), pp.4-148
- (8) 平成30年度防衛白書, 第III部 国民の生命・財産と領土・領海・領空を守り抜くための取組 第1章, 第2節 実効的な抑止及び対処(2018). <https://www.mod.go.jp/j/publication/wp/wp2018/html/n31201000.html> (2019年8月28日閲覧)
- (9) 「防災業務計画」, 関西電力(株) (2018) [https://www.kepcoco.jp/corporate/notice/notice\\_pdf/](https://www.kepcoco.jp/corporate/notice/notice_pdf/) (2019年8月8日閲覧).
- (10) 中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ, 「南海トラフ巨大地震の被害想定について」第二次報告 施設等の被害 被害の様相(2013), pp.25-26
- (11) 中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググル

- ープ,「南海トラフ巨大地震で想定される被害」最終報告 (2013),pp.9-12
- (12) 森安隆, 古屋聡一, 内山宏樹, 野山英郎, 渡辺研司,「首都圏大停電及び新潟大停電から見た依存性の考察と解析に向けた提案」, 第3回情報システム学会全国大会予稿集 A1-4(2007),pp.(A1-4)1-4.
- (13) 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会,「3月11日の地震により東北電力で発生した広域停電の概要」, 内閣府防災情報のページ, 参考資料 2, <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/9/pdf/> (2019年8月8日閲覧).
- (14) 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会第1回会合資料,「被害に関するデータ等」, 内閣府防災情報のページ  
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/1/pdf/> (2019年8月8日閲覧).
- (15) 能島暢呂,「阪神・淡路大震災における電力・ガス施設の被害と復旧」, 安全工学会特集号 35-1, 阪神・淡路大震災特集号 (その2) (1996), pp.50-56.
- (16) 仙台市ホームページ,「指定避難所等への防災対応型太陽光発電システム等の導入」  
<https://www.city.sendai.jp/kankyo/kurashi/machi/machizukuri/energy/hinanzuopv/index.html> (2018年2月8日閲覧)
- (17) 高橋一実,「停電時の大規模避難所の太陽光発電縮小モデル研究」, 摂南大学理工学部電気電子工学科卒業研究報告書, (2018), pp.1-30.