

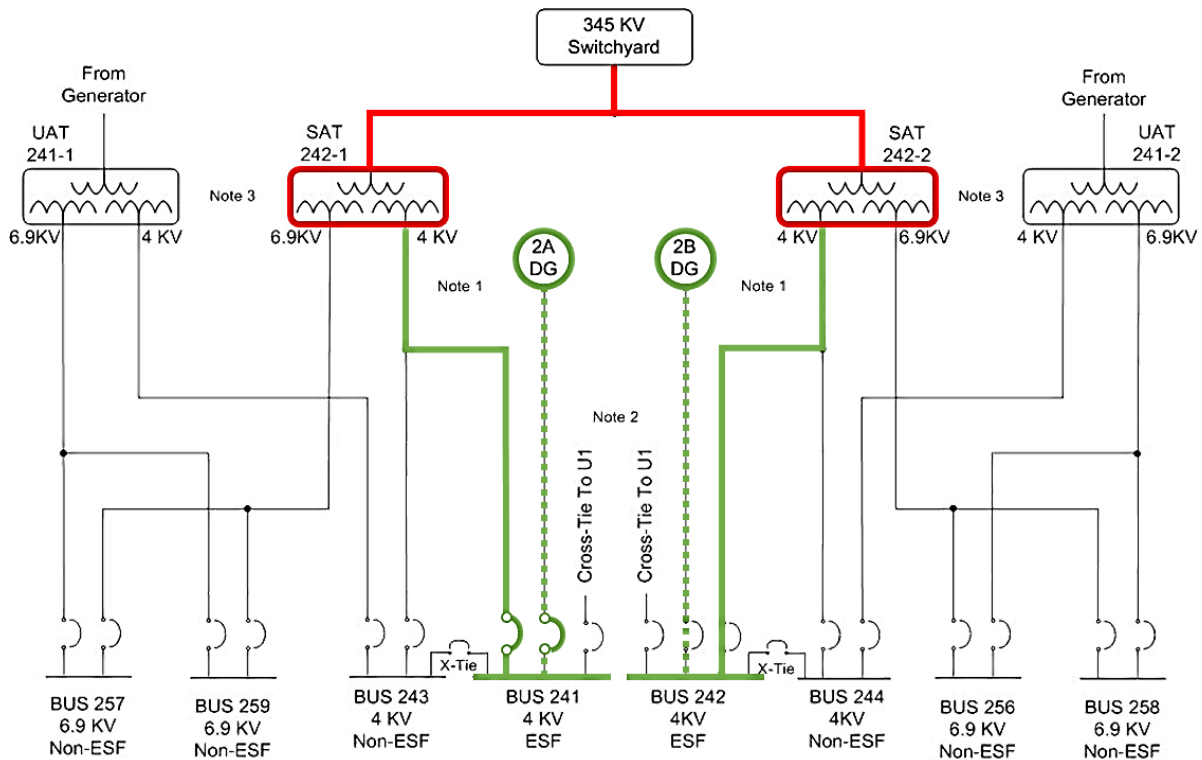
「一相開放故障事象に対する国内原子力発電所の対応」状況報告

令和2年2月26日

技術基盤課

1. はじめに

米国で発生した1相開放故障事象(OPC)[1]を受け、我が国でも設置許可基準規則解釈(実用炉、研開炉、再処理)及び技術基準規則解釈(実用炉、研開炉)が一部改定され、「外部電源に直接接続している変圧器の一次側において3相のうちの1相の電路の開放が生じた場合にあっては、安全施設(ESF)への電力の供給が不安定になったことを検知し、故障箇所の隔離又は非常用母線の接続変更その他の異常の拡大を防止する対策(手動操作による対策を含む。)を行うことによって、安全施設への電力の供給が停止することがないように、電力供給の安定性を回復できること」が求められている。



補足説明: 例えば通常運転時に、補助変圧器(SAT242-1、-2)の高圧側(赤線)で OPC が発生しても、ESFの母線(BUS241、242、緑色)には負荷がほとんどないので、既設設備だけでは異常を検知するのは難しい。その状態で設計基準事象等を想定すると、ESF 母線(緑色)につながる電動ポンプ等が起動するが、OPC の影響で振動などが起こり、過電流保護回路が働きポンプ停止する可能性がある。また、補助変圧器(電源)の異常を検知していないので、その隔離や EDG への接続変更(電源切換え)は行われない。電動ポンプ等の異常に気付いてから、手動操作で電動ポンプの過電流保護回路をリセットする必要があるが、設計基準事象によっては、十分な時間余裕がない可能性がある。

図1 原子力発電所単線結線図の例[2]

i OPC は 1 相または 2 相の電路が開放する事象である。2013 年にスウェーデンで 2 相開放故障事象が発生しており、現在は、2 相開放事象も含めて OPC と呼んでいる。

しかし、上記解釈の一部改定の決定・施行当時(平成 26 年)は、既設設備のままで OPC を直接検知することが困難な場合があり、国内原子力発電所向け OPC 検知システムを開発し、性能検証する必要があったため、巡回点検等により OPC を間接的に検知することとし、技術開発動向をフォローすることとした[3]。検知が難しいのは、通常運転中の原子力発電所の非常用母線(変圧器の二次側)にほとんど負荷がないため、変圧器の一次側(外部電源側)で OPC が起こってもその電流変動が微小で既設設備の検出レンジ外であるためである。なお、再処理施設の場合は、通常運転中であっても非常用母線にある程度の負荷があるため、既設設備でも OPC 検知が可能であることが示されている[4][5]。

2. 国内状況

その後、国内外で OPC 状態の自動検知技術の開発が進み、国内原子力発電事業者から、OPC に対する対応方針と計画が示されたので、以下にまとめる[5][6][7][8]。

- ① 方針:現在 OPC 検知を運転員による目視点検等の人的運用で行っている非常用母線に給電可能な変圧器を対象に、OPC 自動検知システムを設置し、中央制御室で OPC 警報を確認できるようにする。ただし、以下の変圧器は対象から除外できる可能性がある。
 - 既存設備・検出器で OPC 検出可能な変圧器
 - 上流の変圧器との接続に架線設備を含まない変圧器
 - 通常運転状態では常時複数回線から受電している変圧器
- ② 運用方法:OPC 自動検知システムの発する警報を受け、運転員が異常状態を確認した上で、中央操作により故障箇所の隔離(受電遮断器開放)を行う。切り替えに要する時間は 1 分未満である。事業者は OPC 警報発信時の運転員操作に関する手順を策定し、訓練を行う計画である。手動操作による隔離を採用した理由は以下である。
 - 1) OPC は発生していないが OPC と誤検知する頻度を十分低くするには、実機を用いた OPC 検知装置の調整を相当期間行う必要があるため。そもそも国内原子力発電所では、OPC 発生頻度が極めて低いⁱⁱ。誤検知に基づき自動隔離すると、外部電源の信頼性を下げる(外部電源喪失頻度が高まる)ことになる。また、OPC 誤検知により電源自動切換えを行い非常用ディーゼル発電機(EDG)等が起動すると、「意図しない工学系安全施設の作動」となり、運転上の制限(LCO)逸脱となる可能性がある。一方、プラントごとに異なる非常用母線の負荷状態のみならず、外部電源の状態、雷等が OPC 誤検知に関係すると考えられることから、実機を用いた OPC 自動検知システムの運用を相当期間実施してデータを収集する必要がある。
 - 2) OPC 自動検知システムを導入することにより、検知後の運転員操作の負担が大きく軽減するため。OPC 警報が出ている間に事故信号が発信した場合、運転員はただちに中央制御室で故障箇所の隔離(受電遮断器開放)を行う(一操作)。架線等の状

ⁱⁱ 国内原子力発電所の過去 40 年間の OPC 発生件数は 0 である。1 相もしくは 2 相開放は、発電所構内の引込み線以降の気中架線設備で発生するとされている。しかし、国内原子力発電所では引込み線以降はガス絶縁開閉装置(GIS)が使用され電路が保護されているので、構造的に OPC が発生しにくい。また、GIS 内で電路が切れた場合は地絡となり警報が発信される可能性が高い。

態の確認は行わない。事故信号が出ていない場合は、運転員は架線等の状態を目視確認して、OPC が確認されたら通常運転時の外部電源喪失手順にしたがって操作する。この間、ESF につながる電動ポンプ等は待機状態なので異常は起こらない。

- ③ 検知システム：国内3製造事業者がそれぞれに開発した OPC 自動検知システム(図 2, 3, 4)を使用する予定である。それらシステムは 2017 年度に電中研の模擬電力システムを用いて検証試験を行い、全ケース(128 ケース)で検知率 100%であった。ただし、現地適用時には変圧器や負荷などプラント構成が異なるので、検知器動作しきい値や時限設定等を個別に調整する必要がある。誤検知を防ぐ手段についても、実機条件下で調査、調整する必要がある。

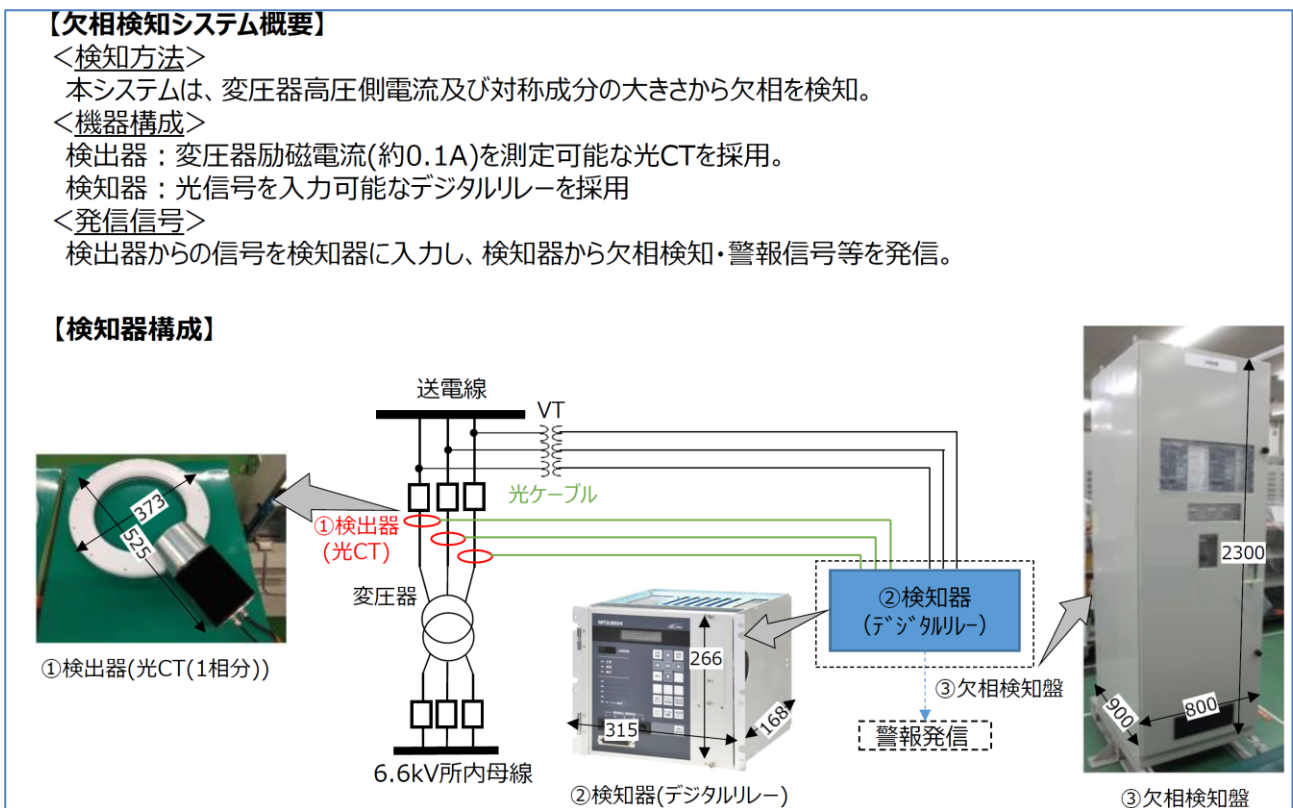


図 2 国内の OPC 自動検知システム(三菱電機製品概要)[8]

【欠相検知システム概要】

＜検知方法＞

本システムは、変圧器高圧側電流、所内側電圧の3相偏差およびその挙動変化から欠相を検知する。

＜機器構成＞

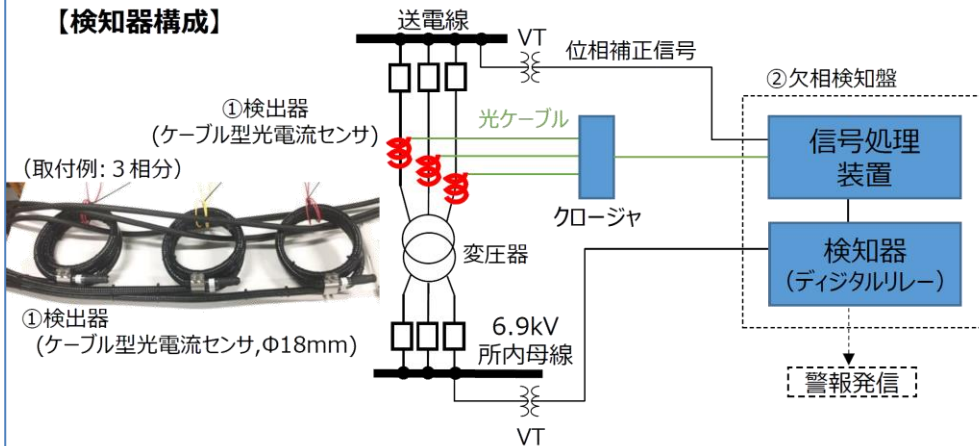
検出器：変圧器励磁電流(約50mA以上)を計測可能。
 主機の改造無く取付可能なケーブル型光電流センサを使用。
 同径にてセンサ部多重化対応可能。

検知器：事象判定ロジックを装荷したデジタルリレーを使用。

＜発信信号＞

検出器からの信号を欠相検知盤に入力し、欠相検知盤から欠相検知・警報信号等を発信。

【検知器構成】



②欠相検知ラック (試作品)
(W700×H2200×D1000)

図3 国内のOPC自動検知システム(日立製品概要)[8]

(1) 検知方法

3相の電圧、電流を監視し、欠相した相で生じる電圧または電流変動により欠相を検知する。

(2) 検知システム構成

● 変流器

検知対象変圧器が無負荷時などの微小電流においても、鉄心形変流器を用いて欠相検知が可能。
 そのため、既設変流器の特性や設置位置等の条件によっては、既設変流器を使用できる可能性がある。

● 欠相検知盤

開閉所の系統保護盤等で使用実績があるデジタルリレーを搭載。
 欠相検知時には、盤面や中操への警報信号を出力する。

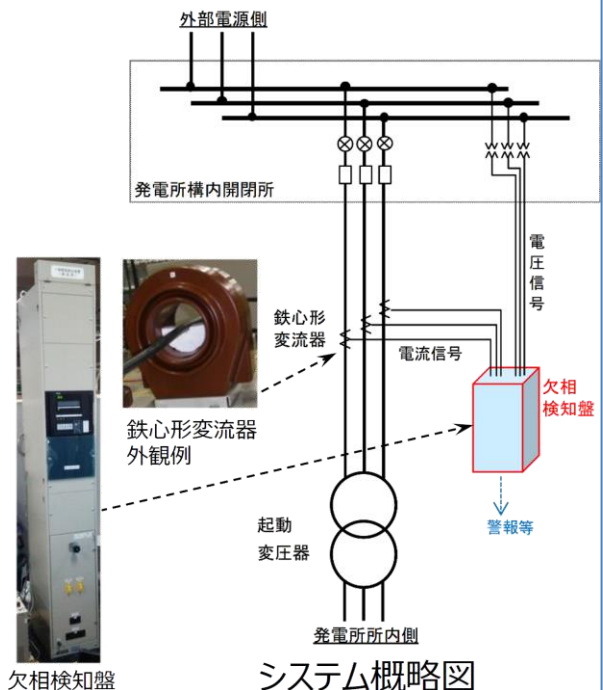


図4 国内のOPC自動検知システム(東芝製品概要)[8]

- ④ システム構成:信頼性向上のための検知システムの多重化は、プラントごとに要否を判断する。検知システムには、対象変圧器と同等の耐震性・信頼性を確保する。

| 電力 | 2019年度 (平成31年度) | | | | | | | | | | | | 2020年度 | | | | | | | | | | | | 2021年度 | | | | | | | | | | | | 2022年度 | | | | | | | | | | | | 2023年度 | | | | | | | | | | | | 2024年度 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------------|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|-------------------------|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|-----------------|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|--------|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 東北電力 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 女川P/S 共用号機 予備変圧器 | | | | | | | | | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | ★ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 東京電力 ホールディングス | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 柏崎刈羽P/S 共用号機 予備変圧器 | | | | | | | | | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | ★ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 中部電力 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 既存設備で対応可能であり、追加対策なし | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 北陸電力 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 志賀P/S 2号予備電源変圧器 | | | | | | | | | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | ★ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 中国電力 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 島根P/S 共用号機 予備変圧器 | | | | | | | | | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | ★ | | | | | | | | | | | | 島根P/S 3号機 補助変圧器 ※ ※ 2025年度着工予定 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 日本原電 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 東海第二P/S 予備変圧器 | | | | | | | | | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | ★ | | | | | | | | | | | | 島根P/S 共用号機 第2予備変圧器 | | | | | | | | | | | | ▲ | | | | | | | | | | | | ★ | | | | | | | | | | | |
| 電源開発 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | (建設中に実施) 大間P/S 予備変圧器 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

[凡例 :契約上の工程 :現地工事着手 :設置完了(試運用の開始)]

(注) 工程は現状予定であり、再稼働時期や関連機器の点検等に伴い変更可能性あり

図 6 OPC 追加対策工程概要(B 電力)[8]

3. 米国対応状況

米国では、OPC 脆弱性に対する原子力産業協会 (NEI) の自主的な対応方針を示した OPC イニシアチブが 2013 年発行され、それに沿った取り組みが進められている。NRC は OPC イニシアチブに賛成し、事業者がそれに沿って課題解決することを点検検証する計画を立て、2017 年 10 月に暫定検査要領[10]を発行した。この要領にそって NRC は、事業者が OPC イニシアチブを適切に実施し、OPC 検知と防護策を反映した許認可用の基準図書を更新していることなどを検査することとした。2018 年には、先行 OPC 対応の 4 プラント(リバーベンド、パロベルデ、バイロン、セントルーシー)等の NRC 検査報告書が発行され、暫定検査要領に沿った検査では問題なしと報告されている[11][12][13][14]。しかしながら、OPC 検知システムの安全分類や多重性要求、技術仕様書への記載の要否などについて産業界と NRC の間で議論が続いている。

2019 年に入り NEI は、「OPC 自動検知を行えば、OPC の自動隔離を行わなくても OPC 事象に関するリスクが著しく低減することを示すことも OPC 対応策となり得る。」という注意書きを OPC イニシアチブに追加することを NRC に提案した[9]。NEI は、OPC の影響を緩和するには運転員による手動操作で十分であることを証明する目的の PRA を用いたリスクインフォームド評価方法を提案し、そのガイダンス(ドラフト)を提示している[15]。先行 OPC 対応プラントで OPC

誤検知が少なくなかったことから、当初 OPC 自動隔離を計画していたが、リスクインフォームド評価を行い、手動隔離を採用もしくは採用検討を開始しているプラントが増加しているⁱⁱⁱ。

4. まとめ

国内原子力発電事業者から、OPC 自動検知システムが開発され、2020 年度から代表プラントにおいて据付工事を開始することと、既存設備で OPC 対応可能である原子力発電所以外のプラントにおける OPC 追加対策工程案が示された。ただし、OPC 対応で先行する米国においても OPC 検知システムの誤検知が課題となっており、国内においても、各サイトで実機を用いた運用を通じて OPC 検知システムの精度を確認し、必要ならば改善しなくてはならない。一方で、OPC 自動検知システムが開発され実機に導入する状況に至ったことから、OPC 自動検知を目的とした設備対応を規制要求化する時期を検討する段階に近づいたと考えられる。

5. 参考文献

- [1] NRC BULLETIN 2012-01: DESIGN VULNERABILITY IN ELECTRIC POWER SYSTEM, <https://www.nrc.gov/docs/ML1207/ML12074A115.pdf>
- [2] Byron Station Single Phase Failure. – NRC, <https://www.nrc.gov/docs/ML1208/ML120810365.pdf>
- [3] 平成 26 年度第 16 回規制委員会(平成 26 年 7 月 9 日)議事録、
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11118514/www.nsr.go.jp/data/000048166.pdf>
- [4] 第 36 回核燃料施設等の新規規制基準適合性に係る審査会合(平成 26 年 12 月 15 日)、資料 9(1)第二十五条:保安電源設備、
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/10953979/www.nsr.go.jp/data/000086545.pdf>
- [5] 被規制者等との面談記録(平成 31 年 05 月 29 日)、一相開放故障事象に対する再処理施設の対応について、議事要旨:<https://www2.nsr.go.jp/data/000271704.pdf>
- [6] 被規制者等との面談記録(平成 31 年 04 月 15 日)、一相開放故障事象に対する原子力発電所の対応について、議事要旨:<https://www2.nsr.go.jp/data/000267906.pdf>
- [7] 被規制者等との面談記録(平成 31 年 05 月 29 日)、一相開放故障事象に対する原子力発電所の対応について、議事要旨:<https://www2.nsr.go.jp/data/000271850.pdf>
- [8] 被規制者等との面談記録(令和元年 11 月 14 日)、一相開放故障事象に対する原子力発電所の対応について、議事要旨:<http://www2.nsr.go.jp/data/000291584.pdf>、資料:<http://www2.nsr.go.jp/data/000291583.pdf>
- [9] Open Phase Condition Initiative, May 2019, Revision 3 DRAFT, <https://www.nrc.gov/docs/ML1912/ML19122A333.pdf>

ⁱⁱⁱ NEI の調査(結果は未公開)によると、モニター期間の OPC 検出器の誤検知頻度が高かったため、半数を超えるプラントで OPC 自動隔離を無効化している。2 基のプラントでは、既存設備で OPC 対策可能と考えている。

- [10] NRC TEMPORARY INSTRUCTION 2515/194, INSPECTION OF THE LICENSEE'S IMPLEMENTATION OF INDUSTRY INITIATIVE ASSOCIATED WITH THE OPEN PHASE CONDITION DESIGN VULNERABILITIES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS (NRC BULLETIN 2012-01),
<https://www.nrc.gov/docs/ML1713/ML17137A416.pdf>
- [11] RIVER BEND STATION, INSPECTION REPORT 05000458/2018010,
<https://www.nrc.gov/docs/ML1808/ML18085B197.pdf>
- [12] PALO VERDE NUCLEAR GENERATING STATION, INSPECTION REPORT 05000528/2018010, 05000529/2018010, AND 05000530/2018010,
<https://www.nrc.gov/docs/ML1810/ML18103A157.pdf>
- [13] BYRON STATION, INSPECTION REPORT 05000454/2018011;
05000455/2018011, <https://www.nrc.gov/docs/ML1813/ML18138A136.pdf>
- [14] ST. LUCIE PLANT – INTEGRATED INSPECTION REPORT 05000335/2018002
AND 05000389/2018002, <https://www.nrc.gov/docs/ML1813/ML18138A136.pdf>
- [15] NEI 19-02 (draft), Guidance for Assessing Open Phase Condition Implementation Using Risk Insights,
<https://adamswebsearch2.nrc.gov/webSearch2/main.jsp?AccessionNumber=ML19050A355>