

「太陽光発電系統連系技術の開発動向」 連系技術・導入施策の動向

電力中央研究所 システム技術研究所

小林 広武

2016年 1月18日

RI 電力中央研究所

© CRIEPI

1

RI 電力中央研究所

内 容

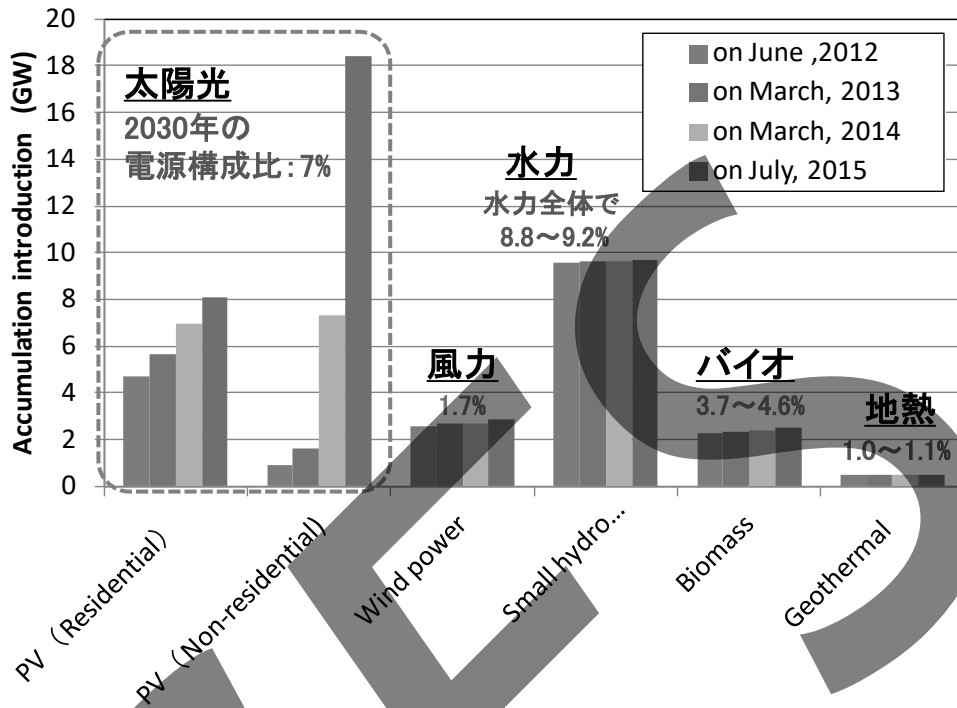
- ・背景 (PV導入状況、将来電力システムの課題)
- ・PV導入対応の従来技術と課題
- ・系統連系規程と連系要件
- ・大量導入対応の新たな対策技術
 - 配電線電圧上昇抑制技術
 - 新型単独運転検出方式
 - 周波数調整に係る対策技術
 - 余剰電力対応策
 - 系統事故時の運転継続要件 (FRT要件)
- ・系統連系保護装置の認証試験法
- ・まとめと今後の課題

© CRIEPI

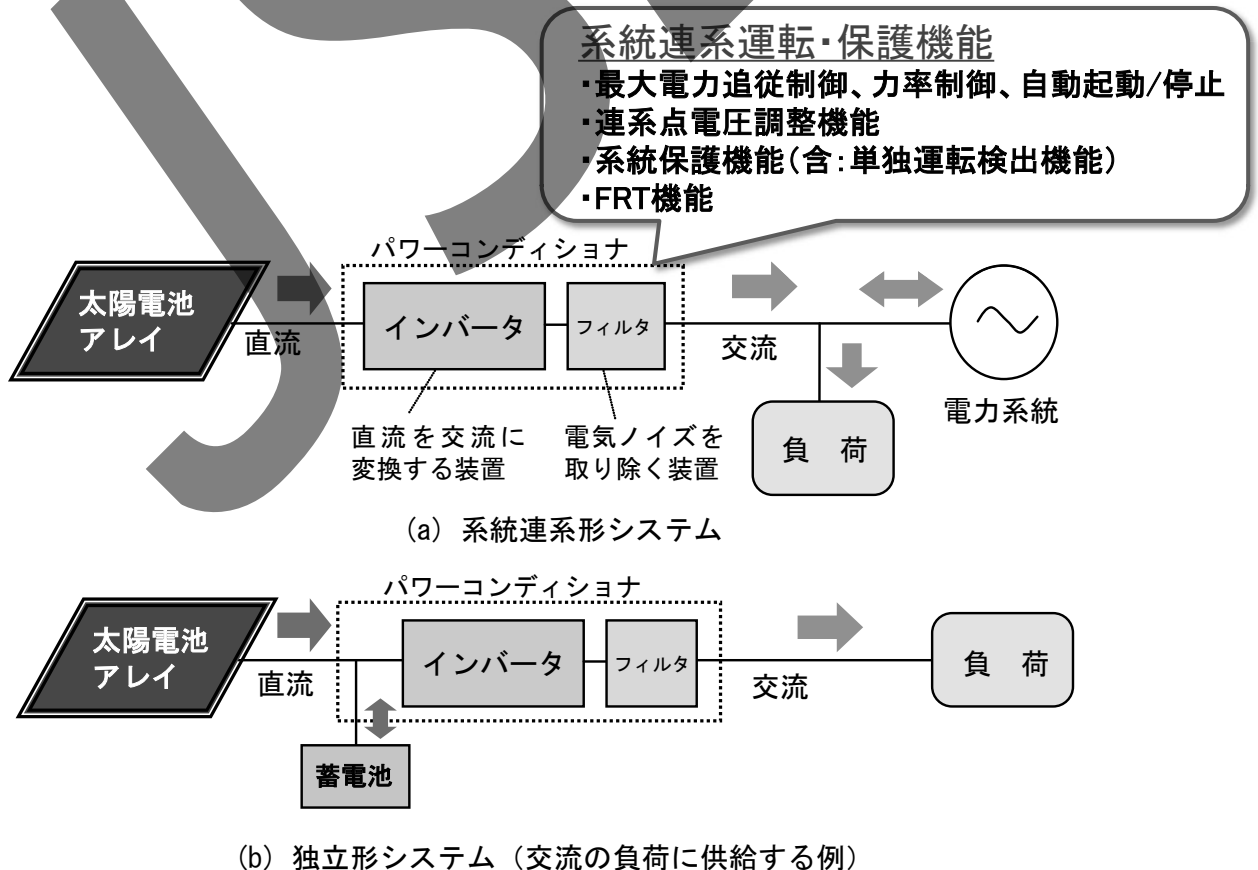
2

再生可能エネルギー導入量の推移

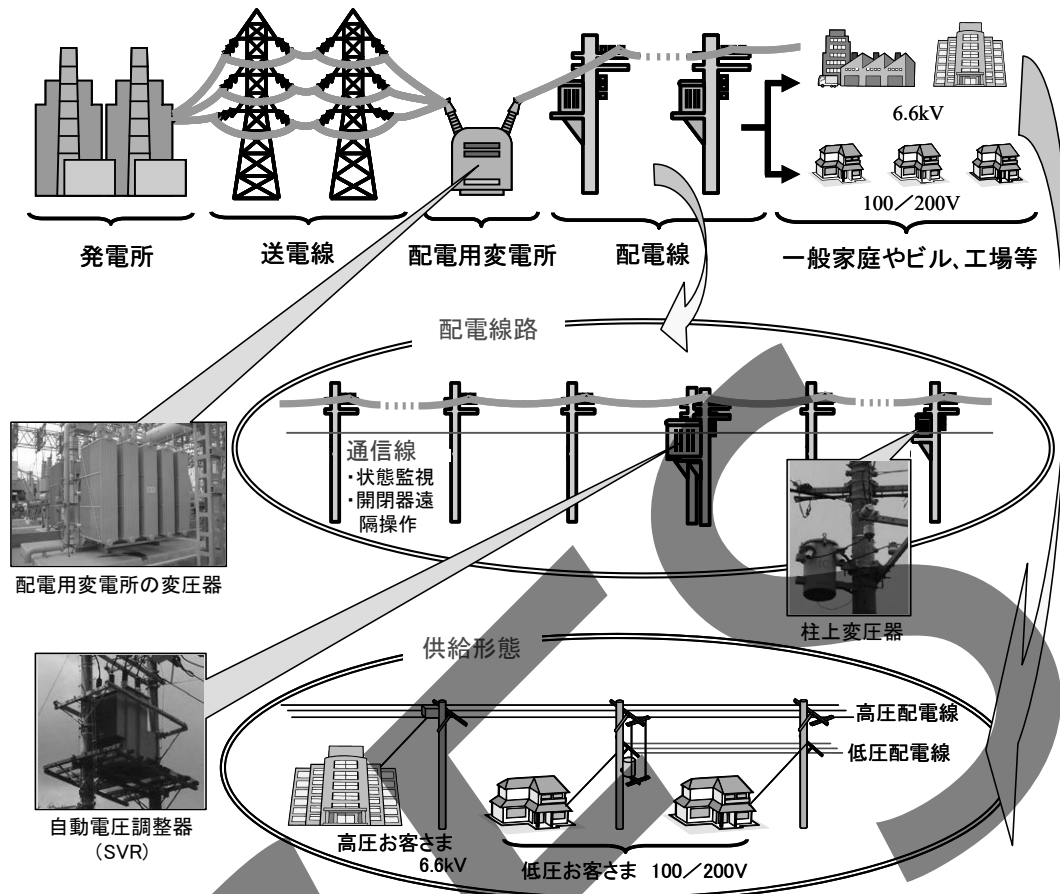
■ 固定価格買取制度 (FIT) の導入により、太陽光発電 (PV) が急増



太陽光発電システムの構成 (例)



電力システムの概要（配電システムの電圧管理・制御法）



© CRIEPI

5

背景（将来電力システムの課題）

■ 太陽光発電を中心とした不安定な再生可能エネルギー電源の大量導入

- ✓ 配電運用、需給運用、系統制御面への影響拡大の可能性
 - 配電運用：電圧変動、単独運転の発生
 - 需給運用：余剰電力問題、予備力確保の問題
 - 系統制御：系統じょう乱（瞬低等）による一斉解列問題

内 容

- ・背景(PV導入状況、将来電力システムの課題)
- ・PV導入対応の従来技術と課題
- ・系統連系規程と連系要件
- ・大量導入対応の新たな対策技術
 - 配電線電圧上昇抑制技術
 - 新型単独運転検出方式
 - 周波数調整に係る対策技術
 - 余剰電力対応策
 - 系統事故時の運転継続要件(FRT要件)
- ・系統連系保護装置の認証試験法
- ・まとめと今後の課題

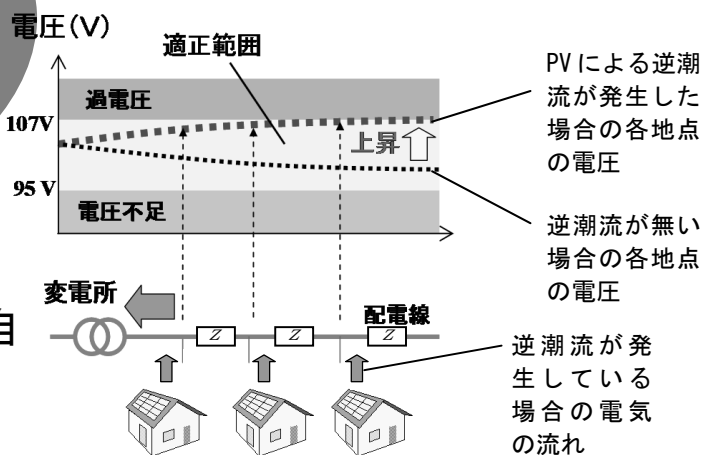
PV導入対応の従来技術と課題(その1)

✓ 逆潮流による配電線電圧上昇

- ・条件によっては、電圧上限値(100V系で107V)を逸脱
- ⇒ 負荷機器の損傷

〈従来技術と課題〉

- ・パワーコンディショナ(PCS)に自動電圧調整装置を設置
- ⇒ 無効電力又は出力電力を制御
- ⇒ 出力抑制の発生
 - 大量導入時には大きな発電機会損失が発生



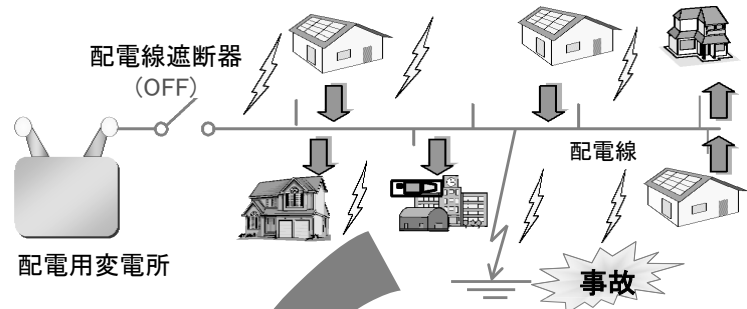
○適正電圧範囲(電気事業法第26条および同法施行規則第44条)

標準電圧	100V(单相)	200V(三相)
維持すべき値	101Vの上下6Vを超えない値	202Vの上下20Vを超えない値

PV導入対応の従来技術と課題(その2)

✓ 配電線停止時に単独運転発生

- ・公衆感電
- ・消防活動への支障
- ・機器の損傷
- ・事故点の復旧遅れ



〈従来技術と課題〉

- ・パワーコンディショナに単独運転検出機能を設置

⇒ 受動的方式と能動的方式の組合せ

→ 受動的方式: 電圧位相跳躍検出、周波数変化率検出、3次高調波電圧歪急増検出

→ 能動的方式: 周波数シフト方式、無効電力変動方式など

⇒ 大量導入時の問題点

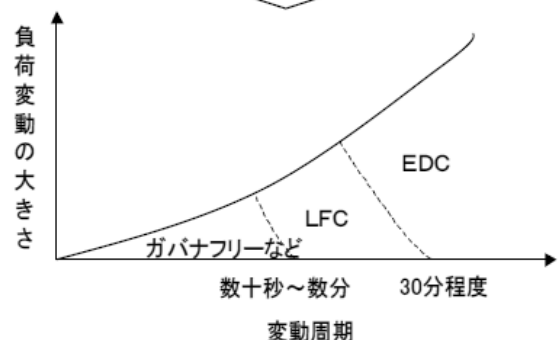
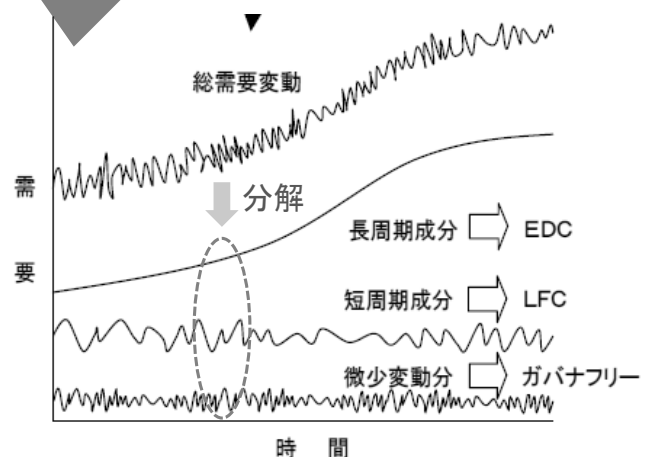
→ 発電電力と負荷量がバランスする機会が増え、受動的方式の検出感度が低下

→ 能動的方式間の相互干渉が顕在化し、検出感度が低下

PV導入対応の従来技術と課題(その3)

✓ 周波数調整面への影響

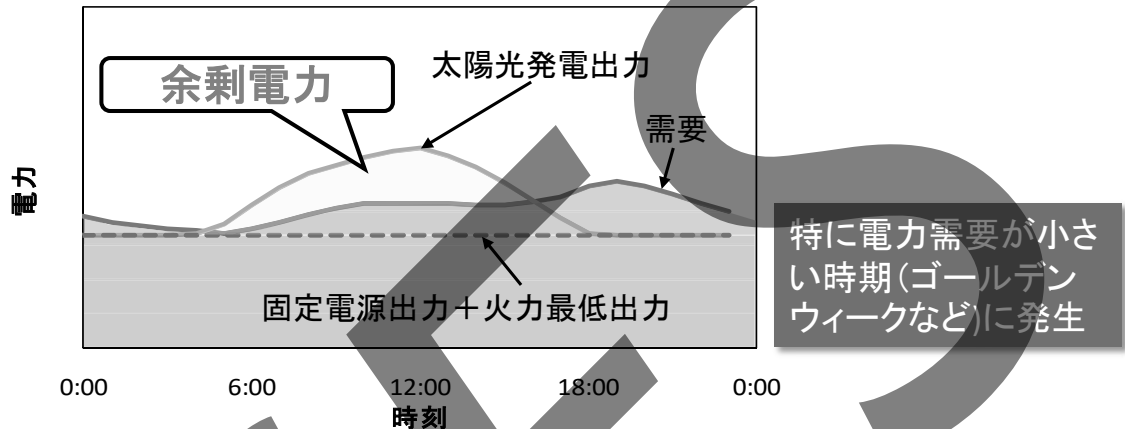
- ・電力システムの周波数調整(火力、水力)
 - 周期を微小変動分、短周期成分、長周期成分に分け、各々がガバナフリー(GF)、負荷周波数制御(LFC)、経済負荷配分制御(EDCまたはELD)により対応
 - PV大量導入により、LFC等において出力変動に対応する周波数調整が難しくなる可能性
 - ⇒ 負荷への影響
 - ⇒ 周波数が過度に変動すると、保護機能により各発電機が運転を停止、広範囲な停電に至る可能性



PV導入対応の従来技術と課題(その4)

✓ 電力系統大での余剰電力の発生

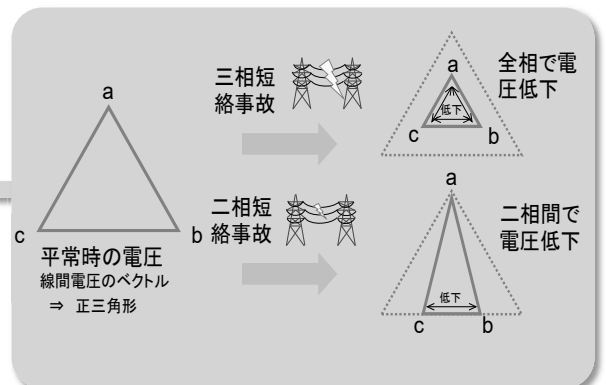
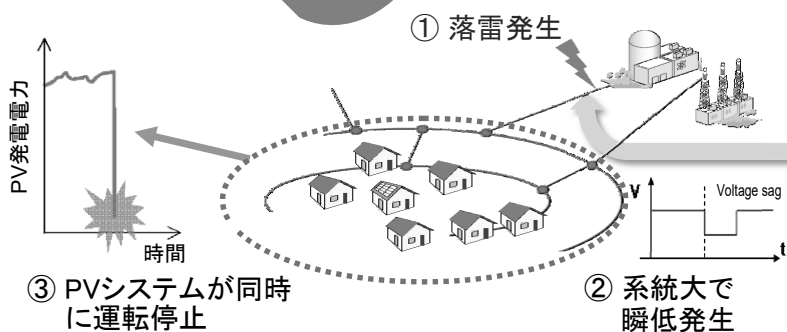
- ・需要が少ない時、主に火力発電の出力を下げても需給調整
⇒ 運転維持のため下げ代に限界あり
- ・調整用発電機の出力が小さい状態でPV出力が増加すると余剰電力が発生
⇒ 周波数が上昇し、負荷への影響や発電機停止を招く



PV導入対応の従来技術と課題(その5)

✓ 上位系統事故時の系統安定性への影響

- ・パワーコンディショナ(インバータ): 交流発電設備が持っている慣性がない。スイッチング用半導体素子保護のため、過電流耐量が小さい
⇒ 系統の過渡的じょう乱(瞬時電圧低下、周波数変動、電圧位相急変)に対し運転維持する能力が弱い
→ 運転停止等により太陽光発電の出力が一斉に低下する可能性
→ 大量導入時には、系統全体で需要と供給のバランスが崩れ、系統の安定性に大きな影響を与える可能性



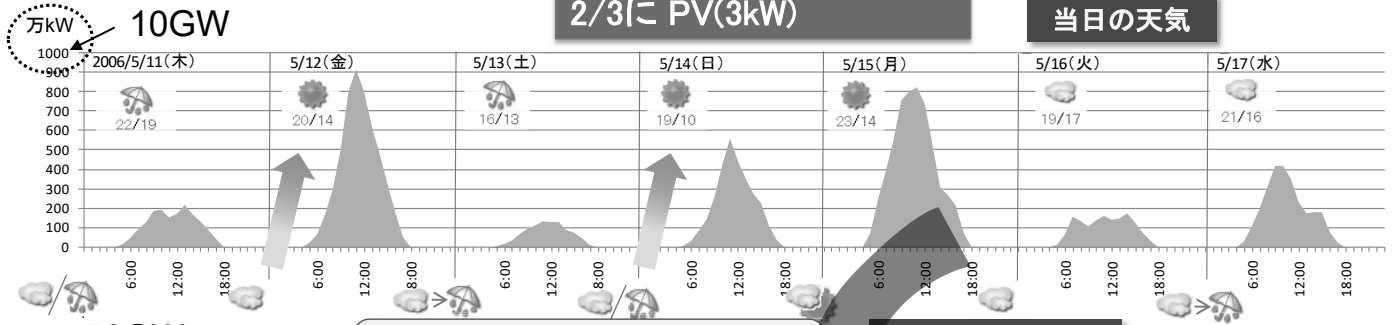
PV導入対応の従来技術と課題(その6)

✓ 需給計画誤差拡大による予備力確保の問題

- ・太陽光発電出力の変化

関東地区、戸建て住宅の
2/3に PV(3kW)

当日の天気

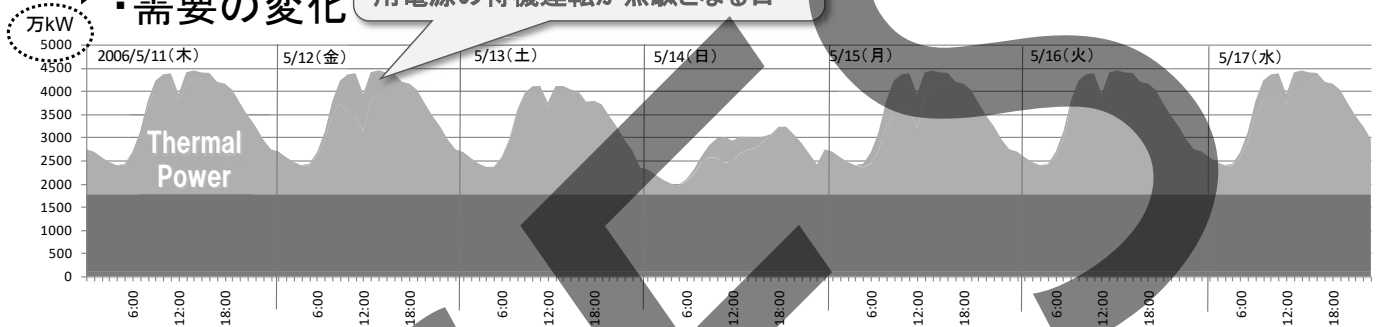


50GW

- ・需要の変化

天気予報はずれにより、一部の調整
用電源の待機運転が無駄となる日

前日の天気予報



内容

- ・背景 (PV導入状況、将来電力システムの課題)
- ・PV導入対応の従来技術と課題
- ・**系統連系規程と連系要件**
- ・大量導入対応の新たな対策技術
 - 配電線電圧上昇抑制技術
 - 新型単独運転検出方式
 - 周波数調整に係る対策技術
 - 余剰電力対応策
 - 系統事故時の運転継続要件 (FRT要件)
- ・系統連系保護装置の認証試験法
- ・まとめと今後の課題

民間規程（電技・ガイドラインを補足・補完）

■ 日本電気協会「系統連系規程（JEAC9701-2006）」平成18年1月改訂、6月発行

- 平成16年10月改訂に沿って電技解釈および電力品質ガイドラインとの対応を明確化
- 従来の技術指針 → 技術規程へ

■ 系統連系規程の改訂については、毎年改訂要望審議を行い、日本電気技術規格委員会の承認後、追補として電気協会ホームページに掲載

太陽光発電の系統連系要件（概要）

- 適正力率の維持 ※下線：大量導入対応として近年追加された要件
 - 受電点の力率を85%以上
 - 小出力PCSは、PCS本体の力率を95%以上（無効電力制御する時は85%以上）
- 高調波の抑制
 - 電流歪み 総合5%、各次3%以下
- 保護装置の施設
 - 発電設備異常：過／不足電圧リレー
 - 系統短絡保護：不足電圧リレー
 - 地絡保護：単独運転検出装置、地絡過電圧リレー（高圧連系の場合）
- 単独運転防止対策
 - 過／不足電圧リレー、周波数上昇／低下リレー
 - 単独運転検出機能（受動的方式および能動的方式の組合わせ）
 - 多数台連系時：新型能動方式
- 不要解列の防止（FRT要件）
 - 瞬時電圧低下（位相変化伴う）、周波数変動に対し、運転継続または自動復帰
- 電圧変動の抑制
 - 自動電圧調整装置の設置（進相無効電力制御または出力制御）、力率一定制御

内 容

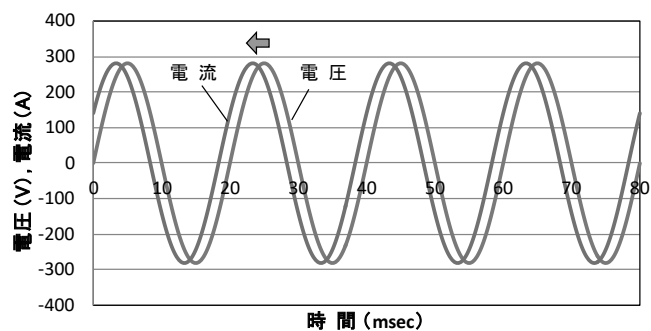
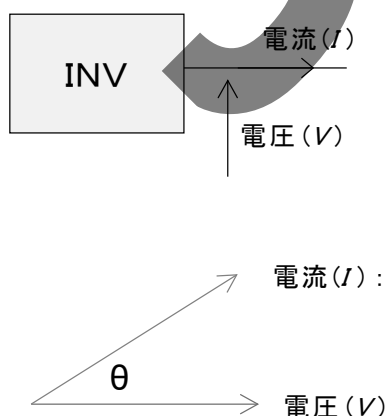
- ・背景(PV導入状況、将来電力システムの課題)
- ・PV導入対応の従来技術と課題
- ・系統連系規程と連系要件
- ・大量導入対応の新たな対策技術
 - 配電線電圧上昇抑制技術
 - 新型単独運転検出方式
 - 周波数調整に係る対策技術
 - 余剰電力対応策
 - 系統事故時の運転継続要件(FRT要件)
- ・系統連系保護装置の認証試験法
- ・まとめと今後の課題

配電線電圧上昇問題の新たな対策技術

■ 力率一定制御方式の採用

⇒ 各太陽光発電において、連系点電圧の上限逸脱の有無に関らず、発電出力に比例させて、常に進相無効電力を発生させる方式が提案され、近年、高压配電線に連系されるメガソーラーを中心に採用が進む

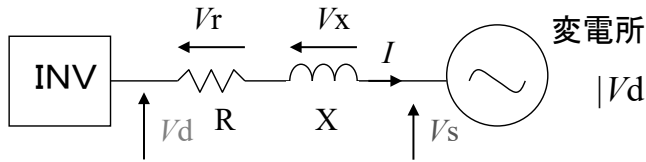
⇒ 低圧連系の太陽光発電についても規定化が検討されている



進相運転

- ・力率 = $\cos \theta$
- ・有効電力(P) = $1/2 |V| |I| \cos \theta$
- ・無効電力(Q) = $1/2 |V| |I| \sin \theta$

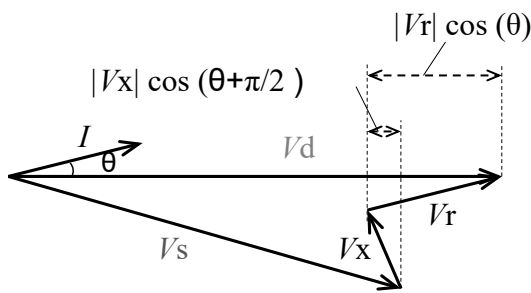
進相運転による電圧上昇抑制の原理



$$|V_d| = |V_s| + |V_r| \cos(\theta) + |V_x| \cos(\theta + \pi/2)$$

$$= |V_s| + |V_r| \cos(\theta) - |V_x| \sin(\theta)$$

$$= |V_s| + |I| \{ R \cos(\theta) - X \sin(\theta) \} \text{ ---- ①}$$



$|V_d|$ を $|V_s|$ に等しくするためには、

$$R \cos(\theta) = X \sin(\theta) \text{ ---- ②}$$

ここで、 $P_a (=1/2 |V_d| |I|)$ を皮相電力とすると、

$$P = P_a \cos(\theta) \text{ ---- ③}$$

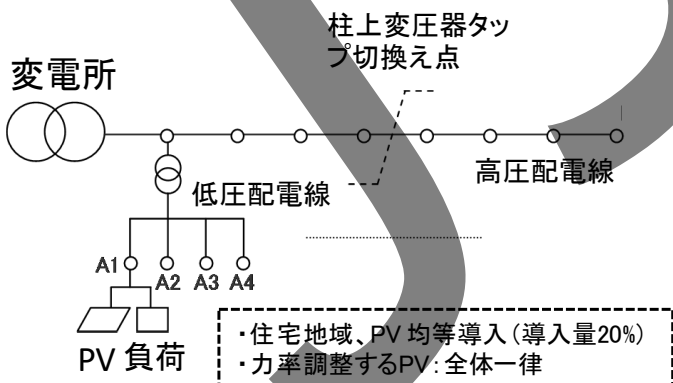
$$Q = P_a \sin(\theta) \text{ ---- ④}$$

式③、④を②に代入し、整理すると、

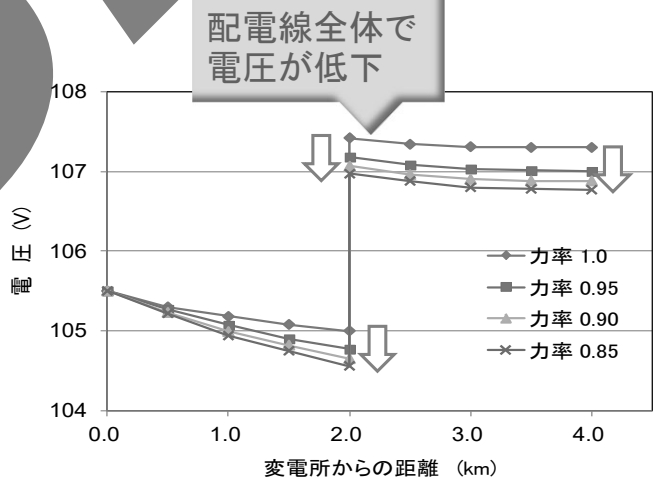
$$Q = (R/X) P \text{ ---- ⑤}$$

式⑤に従い、 Q を制御すると、電圧上昇を防止できる。
ただし、規定により Q は P の0.62倍以下(力率0.85以上)に要制御

力率一定制御の効果(シミュレーション結果)



(a) 配電線モデル(PV:4kW/台)



(b) シミュレーション結果
・パラメータ: 太陽光発電の力率(進み)

留意点

- 配電線の電流値が大きくなり、配電線抵抗による電力損失が増加
- 夏期等の重負荷期に電圧下限値(95V)を逸脱する可能性

単独運転検出方式（従来型、低圧連系用）

	方式名	内容
受動的 方式	電圧位相跳躍検出方式	単独運転移行時に発電出力と負荷の不均衡による電圧位相の急変等を検出する方式
	3次高調波電圧歪急増検出方式	逆変換装置に電流制御型を用い、単独運転移行時に変圧器に依存する3次高調波電圧の急増を検出する方式
	周波数変化率検出方式	単独運転移行時に発電出力と負荷の不均衡による周波数の急変等を検出する方式
能動的 方式	無効電力変動方式	発電出力に周期的な無効電力変動を与えておき、単独運転移行時に現れる周期的な周波数変動、電圧変動等を検出する方式
	有効電力変動方式	発電出力に周期的な有効電力変動を与えておき、単独運転移行時に現れる周期的な周波数変動、電圧変動等を検出する方式
	負荷変動方式	発電設備に並列インピーダンスを瞬間的、かつ周期的に挿入し、単独運転移行時に現れる電圧変動または電流変動の急変等を検出する方式
	周波数シフト方式	発電設備から出力する周波数特性に予めバイアス等を与えておくことによって、単独運転移行時に発電設備の周波数特性等と単独系統の負荷特性で決まる周波数にシフトする特性を利用して単独運転を検出する方式

配電線大量・集中連系対応の新単独運転検出方式

・要求条件

- 不検出となる条件が無いこと
- 高速検出：0.2秒以内
- 複数台運転時にも相互干渉が無いこと

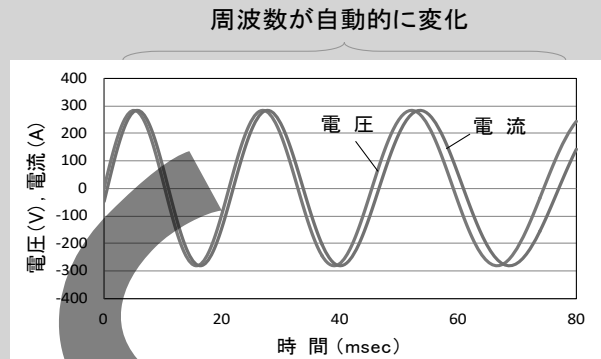
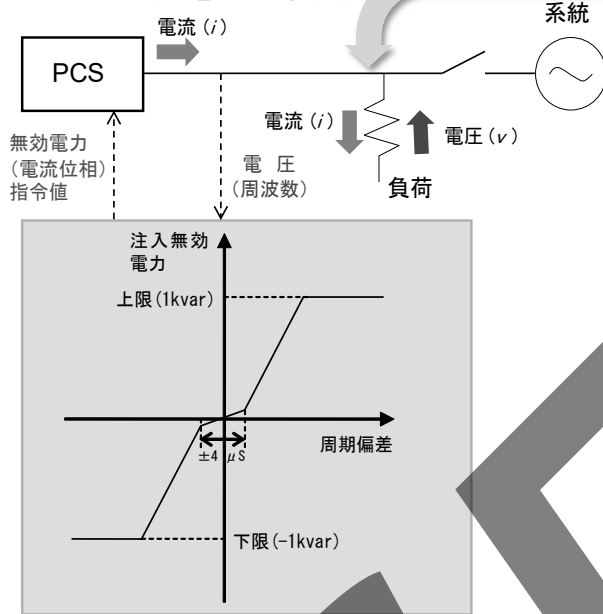
・NEDO受託研究「集中連系型太陽光発電システムの実証研究」 {～H19年度、(株)関電工殿受託}で開発

- 「ステップ注入付周波数フィードバック方式」(能動的方式の一種)
 - ・周波数変化量に比例して注入無効電力を増大させ、周波数変化を増長。周波数変化率の変化を検出
 - ・発電電力と負荷量が平衡時の検出時間遅れを防ぐため、別途、高調波電圧歪み等を監視。周波数変化が無い条件で、無効電力をステップ注入

新型単独運転検出方式「ステップ注入付周波数フィードバック方式」の概要

- 周波数変化に比例させてPCSから無効電力を出力、周波数を強制発散
- 周波数変化率を監視・検出し運転停止^(注)。FRT要件(周波数変動)との両立性考慮
- 別途、高調波電圧急増等を監視。周波数変化が無い条件で無効電力をステップ注入

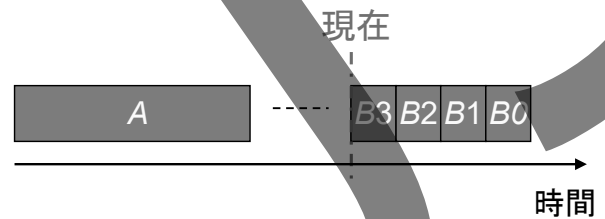
単独運転時の電圧周期偏差と注入無効電力の関係



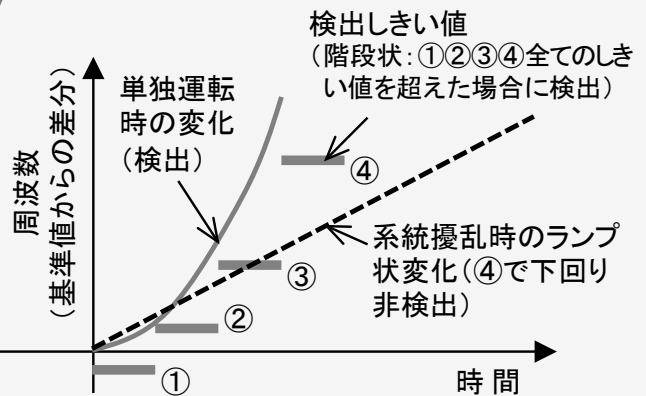
・単独運転検出時間
⇒ 条件によらず0.2秒未満達成

(注) 平成15～19年度NEDO委託業務成果報告書「集中連系型太陽光発電システム実証研究」、平成20年5月

新型単独運転検出方式「ステップ注入付周波数フィードバック方式」の概要 (その2: 周波数変化率検出方法)



- ・過去の10サイクルの平均周期 (=A)
- ・Aと現在の1サイクルの周期を比較
- ・4サイクル連続して、しきい値を逸脱すると検出 (しきい値は1サイクル毎に増大)



・周波数変化耐量
⇒ 2Hz/秒まで不要検出なし

周波数調整に係る対策技術

■ 需給計画・運用への影響の緩和策

- ⇒ 系統大での太陽光発電出力のリアルタイムでの推定技術、数十分～数日先の出力予測技術の各精度向上化が課題
 - 各機関で開発・改良が進められている

■ 周波数調整問題への対応

- ⇒ 代表例として、宮古島において、4000kW級メガソーラー、4000kW ナトリウム硫黄(NaS) 電池で構成される「宮古島メガソーラー実証設備」を設置し、実システムを用いた各種実証運転が推進
 - 太陽光の急峻な短周期や長周期の出力変動を平滑化する制御機能及び最適蓄電池容量の検証
 - 既存電源(ディーゼル発電機)の周波数制御に蓄電池を組合せた周波数調整機能の検証
 - 本土システムにも参考となるような各種制御方式が実証
(★詳細は、「宮古島メガソーラにおける実証研究」を参照)

余剰電力対応策の概要

- ① 余剰電力が発生する可能性のある日や時間帯での発電出力または逆潮流の抑制(短期)
- ② 日中における新たな負荷需要の創生(中・長期)
- ③ 蓄電池等の電力貯蔵設備の新設や増設(中・長期)
- ④ 地域間を連系する送電設備の増強(中・長期)

出力抑制ルールの見直し

■ 2015年1月に再生可能エネルギー特別措置法施行規則が改正 (出力制御ルールの見直し)

- ① 出力制御可能な電源を小規模設備まで拡大
⇒ 500kW以上のみの対象から、500kW未満も対象
- ② 出力制御の上限を、日数単位(30日/年)から時間単位へ
⇒ 太陽光発電で360時間/年
- ③ 接続可能量を超過した場合には、指定電気事業者制度を活用し、出力制御の上限を外して、接続を継続

〈さらに、以下が考慮〉

- ・地域毎の系統状況等を踏まえ、電力会社ごとに上記ルールの猶予期間を設定
- ・太陽光発電の出力制御は、非住宅用が主となる10kW以上の制御を先行。10kW未満は、自家消費分を超えて発電される余剰分を出力制御の対象とする方向

■ 改正に先立ち、資源エネルギー庁補助事業の一環で、電力系統側との双方向通信による太陽光発電出力制御の実証事業「次世代型双方向通信出力制御実証事業」が青森県六ヶ所村実フィールドで実施(2011～2013)

(★詳細は「PCS双方向通信方式の実証」を参照)

負荷創生による余剰電力有効利用法

■ 資源エネルギー庁 補助事業 28法人共研「次世代送配電系統最適制御技術実証事業」[2010～2015 (2013～2015: フォローアップ研究)]

⇒ ヒートポンプ(HP)式給湯機の昼間運転、電気自動車(EV)への充電等、負荷創生による余剰電力有効利用法の開発・実証



PVシステム



EV (V to H 有り)

東京大学
柏キャンパス



HP 式給湯機(3メーカー)

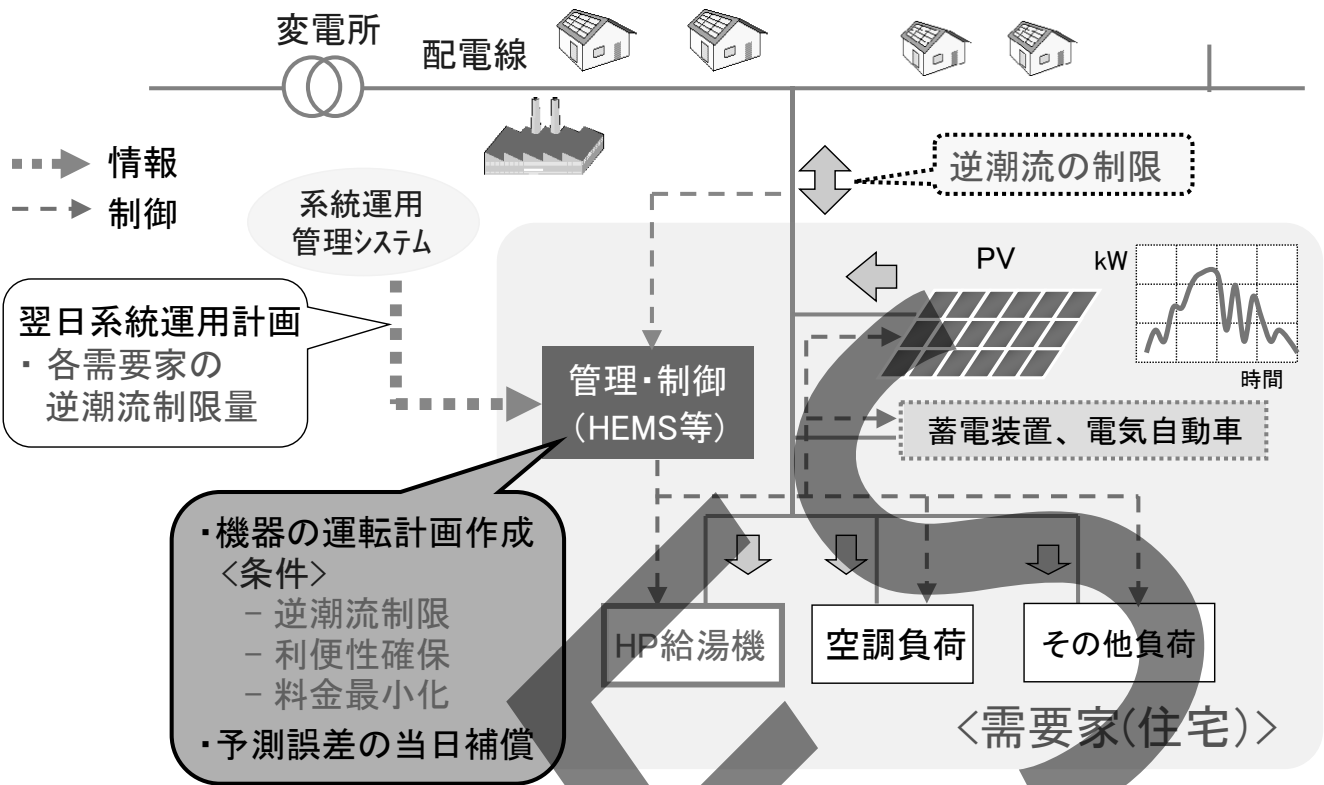


監視・制御システム



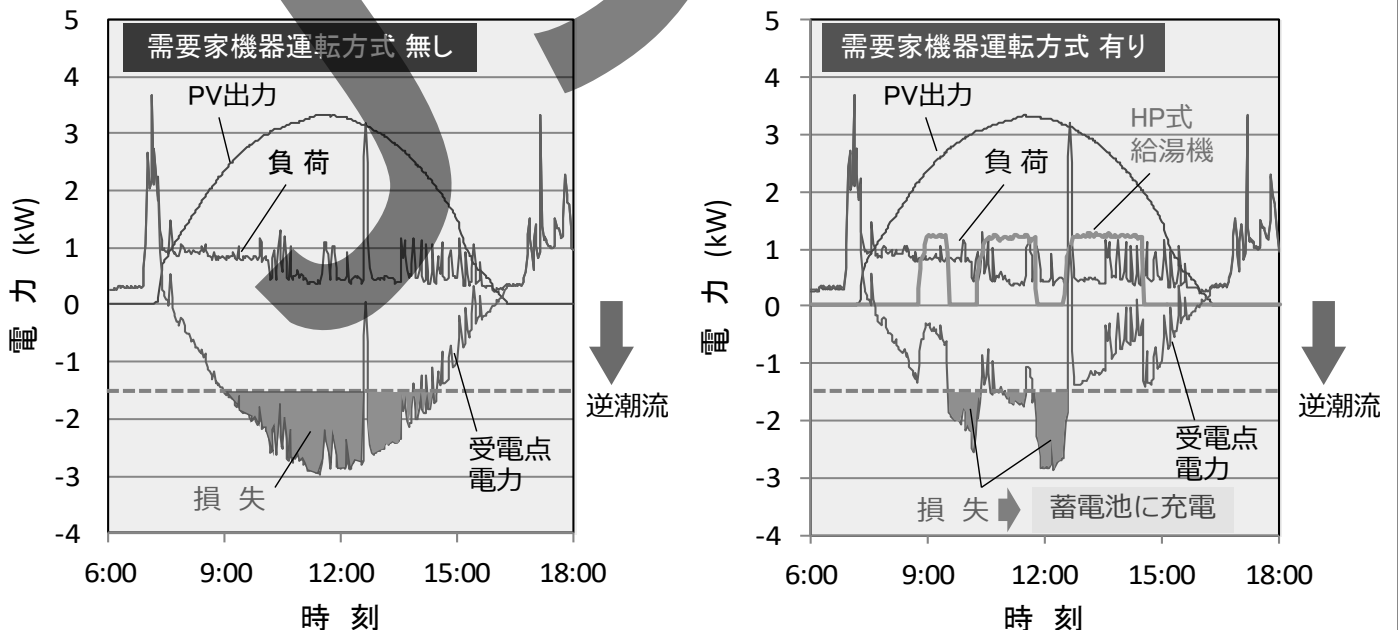
見える化端末

需要家機器運転方式のイメージ



HP式給湯機運転方式の実証試験結果(例)

■ PV発電機会損失が有意に低減し、翌日運転計画、リアルタイム補償の効果を確認



※ PV: 4kW 級、HP式給湯機: 定格 1.5kW、貯湯槽: 370L(沸きあげ: 約 3 時間)

系統事故時の運転継続要件 (FRT要件)

- 「系統連系規程」において、近年、インバータにより連系する分散形電源のFRT要件を整備
 - ⇒ 太陽光発電設備、風力発電設備、燃料電池設備、ガスエンジン設備、蓄電池設備

- 対象とする系統擾乱
 - ⇒ 広範囲に影響が及ぶものとして、
 - ①送電線事故による瞬時電圧低下や瞬時的な周波数上昇
 - ②大規模電源脱落や系統分離による周波数変動

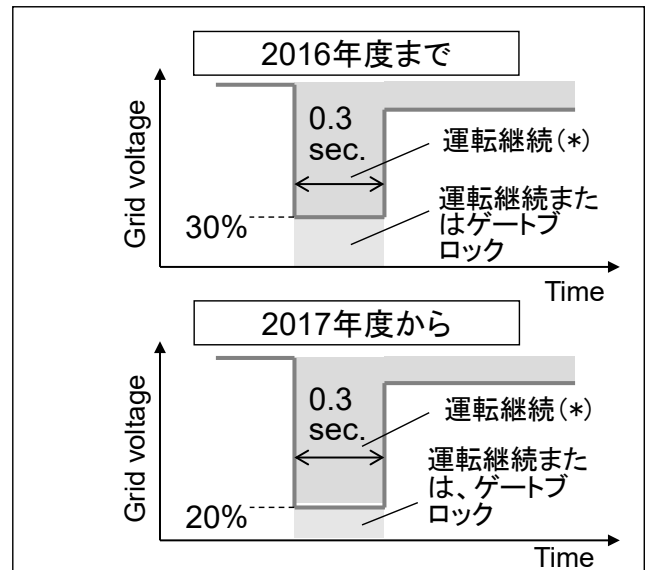
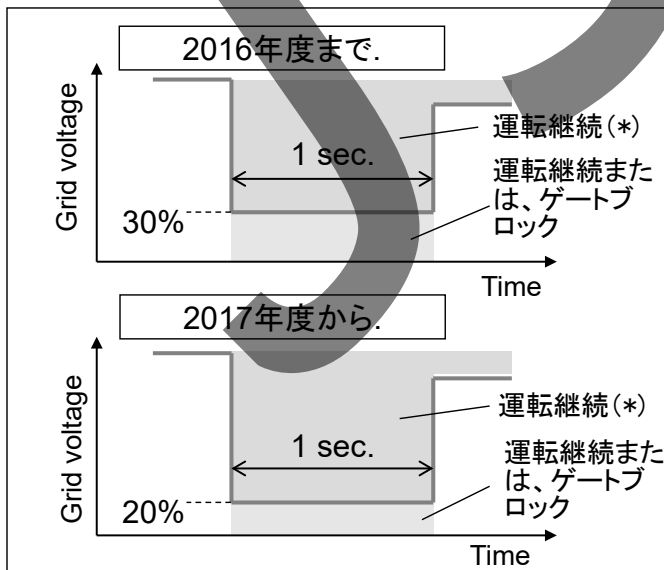
瞬時電圧低下に対するFRT要件 (太陽光発電)



単相発電設備



三相発電設備

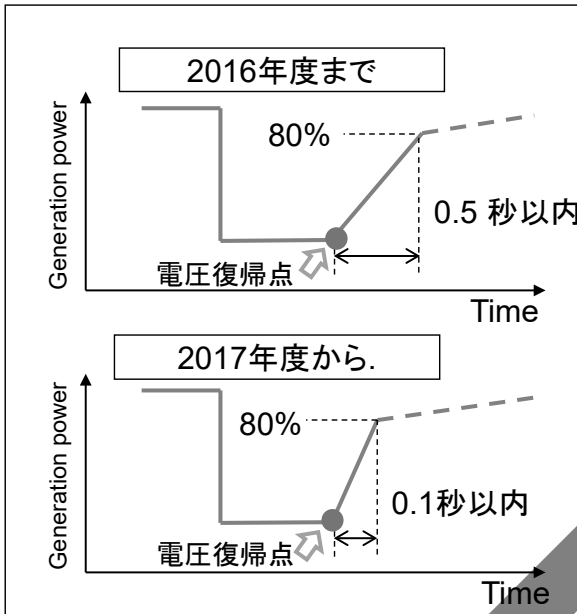


(*) 二相短絡事故を想定し、位相急変(例:41度)も要考慮

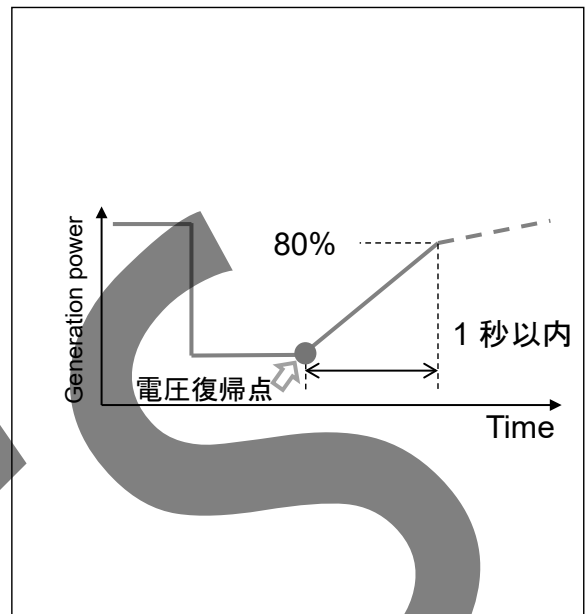
電圧低下継続時間は、殆どのケースが0.3秒以内であるが、住宅用等の単相連系のPVでは、使用するPCSの継続時間に対するマージンが大きく、継続時間を1秒に設定

電圧復帰後の出力回復要件(太陽光発電)

瞬低時の残電圧20%(または30%)以上



瞬低時の残電圧20%(または30%)未満



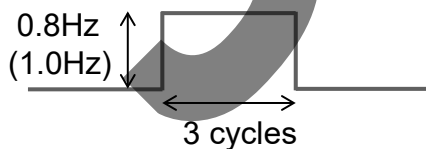
上記要件は、単相、三相発電設備ともに適用

周波数変化に対するFRT要件

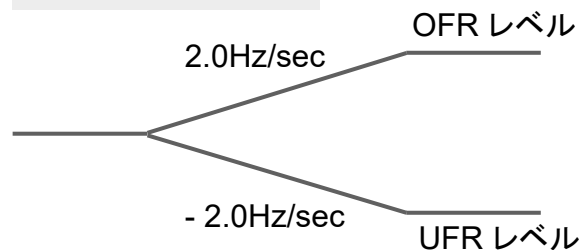
以下の周波数変動に対して運転継続すること

- ステップ状に0.8Hz (50Hzの場合)、または1.0Hz (60Hzの場合)に上昇し、3サイクル継続する周波数変動
- +/- 2.0 Hz/secの変化率でランプ状に変化する周波数変動

ステップ状変化



ランプ状変化



- ✓ 瞬低を含め、従来形単独運転検出方式(受動的方式)が不要検出する可能性
 - 検出カウンター採用、検出しきい値・時限の適切化等の改良を要考慮
 - 受動的方式の検出感度低減化に伴う能動的方式の制御定数見直しも要考慮

内 容

- ・背景(PV導入状況、将来電力システムの課題)
- ・PV導入対応の従来技術と課題
- ・系統連系規程と連系要件
- ・大量導入対応の新たな対策技術
 - － 配電線電圧上昇抑制技術
 - － 新型単独運転検出方式
 - － 周波数調整に係る対策技術
 - － 余剰電力対応策
 - － 系統事故時の運転継続要件(FRT要件)
- ・系統連系保護装置の認証試験法
- ・まとめと今後の課題

系統連系保護装置の認証試験法について

- 電力会社と需要家との系統連系協議等の円滑化に資することを目的
 - 家庭用等の小型システム(太陽光発電の場合50kW未満)の系統連系保護装置(通常はPCSに内蔵)の認証制度が(一財)電気安全環境研究所(JET)において実施。以下の試験・調査結果に合格したものを認証
 - ⇒ 「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」、「電気設備技術基準」、および「電気用品安全法」を基にJETが作成した認証試験基準への適合性を試験
 - ⇒ 同等の製品を継続的に製造することができる体制にあることを確認するための工場調査
 - 50kW以上のPCS試験法について
 - ⇒ 大規模な試験装置が必要。メーカーの自社試験を含め、試験者の費用負担が大
 - 経済産業省「新エネルギー等共通基盤整備促進事業」の中で「太陽光発電用大規模パワーコンディショナの標準ミニモデルに関する研究」を実施。PCSミニモデルの標準仕様、およびFRT試験、単独運転検出機能試験等の試験方法を検討
- (★詳細は、「ミニモデルを用いた試験法の提案」を参照)

まとめと今後の課題

- 大量導入に伴い、新たな連系技術が要件化、または要件化に向けた検討が進められている
 - ⇒ 力率一定制御による配電線電圧上昇抑制、新型単独運転検出方式等の配電システムの電力品質・安全性を維持する新たな連系技術
 - ⇒ FRT機能、出力抑制機能等の電力システム全体の安定運用維持に資する技術
- これらの機能間にはトレードオフの関係が存在するものもあるなど、パワーコンディショナの仕様が複雑化。コストや不確実性の増大
- さらに、蓄電池や燃料電池と組み合わせたシステムや、ACモジュール（★詳細は、「長寿命ACモジュール」を参照）といった新たな太陽光発電システムの開発・導入も考えられている
- 今後は、需要家EMS、通信システム等、並行して開発・導入が進められている次世代グリッド・コミュニティ関連の新たなインフラ技術との融合も考えた、よりの確で合理的な運用・制御システムの構築が課題

ご清聴ありがとうございました！