

研 究 期 報

No. 105

平成 28 年 12 月

四 国 電 力 株 式 会 社
株 式 会 社 四 国 総 合 研 究 所

研究期報 1 0 5 号 目次

蓄電池を含んだ直流回路の短絡地絡保護.....	1
Short-circuit protection and ground fault protection for HVDC including batteries	
V P P 技術を使った新たな住宅向けサービス.....	13
The new residential services with Virtual Power Plant technology	
脱硝触媒の耐摩耗性評価方法の検討.....	27
Study on evaluation method of resistance to abrasion for De-NOx catalyst	
電力建物における地震時の実挙動把握に向けた取組み ～地震観測等に基づく評価事例～.....	33
Endeavors to Estimate Actual Behavior of Electric Power Buildings under Earthquake Load -Evaluation case based on seismic observation-	
長距離配電線に対応したメガソーラー発電の無効電力制御による 電圧変動抑制の実証試験.....	43
Verification Test of Reactive Power Control of Mega-solar System for Voltage Regulation with Long Distribution Line	
架空送電線の鋼心腐食メカニズムに関する研究.....	53
Study on steel core corrosion mechanism of the overhead power transmission line	

蓄電池を含んだ直流回路の短絡地絡保護

目 的

蓄電池を含んだ直流回路では蓄電池の内部抵抗が極めて小さいため非常に大きな短絡電流が流れること、低圧回路であっても直流大電流の遮断は難しいことから、蓄電池を含んだ直流回路の短絡保護をいかに行うかは大きな課題である。蓄電池を含んだ直流回路の短絡・地絡保護の実験・検討を実施し、現状考えられる実用的な保護方式を提案する。

主な成果

1. 短絡保護

直流短絡保護には、ヒューズおよび配電用遮断器（気中遮断器含む）の適用が可能である。ヒューズは、遮断時間は短いが定格電流の5倍程度までの小電流を遮断できない。配電用遮断器は、全領域の電流を遮断できるが遮断時間が長い。ヒューズ、配電用遮断器それぞれ一長一短があるため、併用（場合によっては直列使用）することが望ましい。

2. リチウムイオン電池の短絡電流

リチウムイオン電池の短絡電流値は、通常のJIS法による内部抵抗値測定結果から予想される電流値よりはるかに大きく（今回実験に使用した電池では約2倍）、短絡電流を正確に知るためには短絡実験を行う必要がある。

3. 地絡保護

100Vを超える低圧直流回路の接地方式は、対地電圧を抑制できる中間点高抵抗接地が一般的である。人体感電時の安全確保のため、地絡電流を10mA程度に制限できる接地抵抗値が選択される。

直流回路全体の地絡発生を検知するために、接地点地絡電流検出方式の地絡検出器を必ず設置し、回路構成が複雑で特定機器やフィーダの地絡を検出する必要がある場合は、正負電流差分検出方式の地絡検出器を必要箇所に設置することが望ましい。

4. 交流－直流変換器の絶縁

地絡電流の回り込みを防止するため、交流－直流変換器には絶縁変圧器を設置するか、変換器を絶縁型（高周波絶縁）にする必要がある。直流回路においても太陽光発電や負荷等地絡が予想される機器を接続するDC－DCコンバータなどの変換器は絶縁型とすることが望ましい。

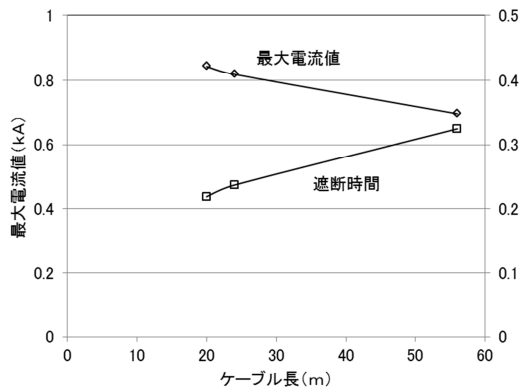


図-1 ヒューズ遮断特性 (DC400V)

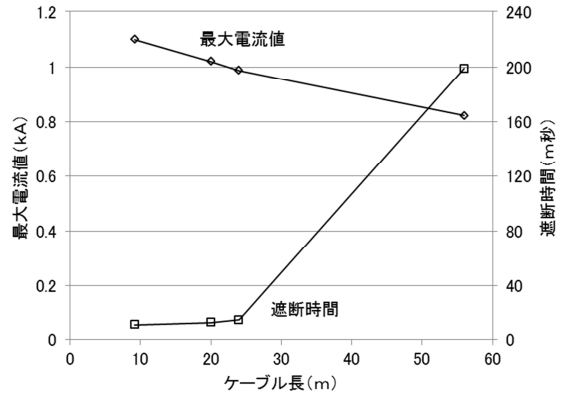


図-2 配電用遮断器遮断特性 (DC400V)

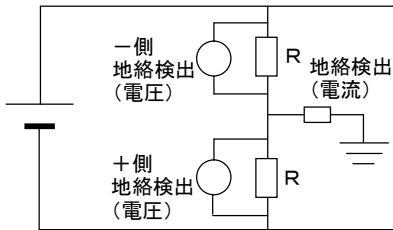


図-3 接地点地絡電流検出方式地絡検出 (中間点抵抗接地)

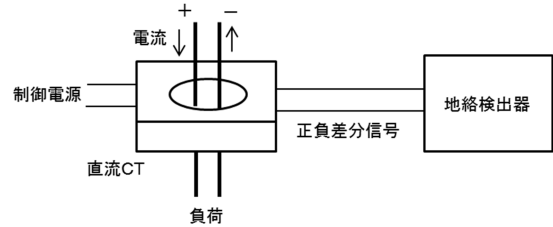


図-4 正負電流差分検出方式地絡検出 (フィーダ)

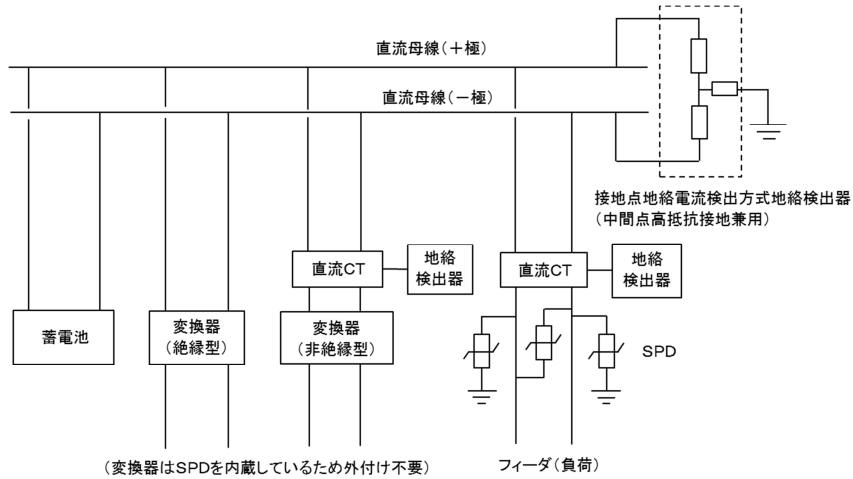


図-5 直流地絡保護回路の例

研究担当者	多田安伸 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部)
キーワード	HVDC、短絡保護、地絡保護、リチウムイオン電池、ヒューズ
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp

[無断転載を禁ず]

VPP技術を使った新たな住宅向けサービス

目 的

小型太陽光発電（10kW 未満）の再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）による買取りが2019年11月より順次終了する。太陽光発電の有効活用や自家消費を進めるために、蓄電池等需要家小型機器を遠方から一括制御するバーチャルパワープラント（VPP）等の開発が進められている。住宅向けにどのようなサービスが可能か、サービスを実施するにはどのような課題があるかを検討した。

主な成果

- ・住宅側の便宜に悪影響を及ぼさないこと、住宅太陽光発電のFIT買取終了後の売電価格は不明であるが余剰電力と同程度のかかなり安価になり太陽光発電の自家消費が経済的に有利になると予想されることから、蓄電池や蓄湯式給湯器など蓄エネルギー機器の蓄エネルギー時間帯の夜間一昼間調整が住宅向けのVPPサービス内容として最も有力と考えられる。
- ・VPPサービスでは住宅内の制御や電力計測にHEMSを使用する。HEMSはリアルタイム計測やリアルタイム制御に対応していないため、VPPサービスは運転時間帯など事前に蓄エネルギー機器の設定を変更するだけで、蓄電池の充放電電力制御など実際のリアルタイム制御は機器の制御装置で行う必要がある。したがって、過去実績や天候予想を使って各住宅の翌日の太陽光発電や住宅電力需要を予想し、前日夕刻には翌日の蓄電池や蓄湯式給湯器の運転時間帯（夜間帯、昼間帯）を各住宅の機器制御装置に送信する必要がある。
- ・電気温水器は通常、深夜電力に対応しているがHEMSの通信規格であるECHONET-Liteに対応していないことから、深夜電力と同様なスイッチによる制御を適用する必要がある。旧型のエコキュートはECHONET-Liteにも深夜電力にも対応しておらず、現状ではVPPサービスに対応できない。エコキュートはECHONET-Lite対応の新型をサービス対象とするしかない。
- ・住宅用蓄電池は普及していないため、ECHONET-Lite対応の新型をサービス対象とすることでよい。住宅用蓄電池は経済性に難があり普及は難しいと予想される。一方、大型蓄電池シェアリングサービスは経済性に優れること、蓄電池を設置できない住宅にもサービスを提供できることから、今後の住宅向け蓄電池サービスとして有望と考えられる。

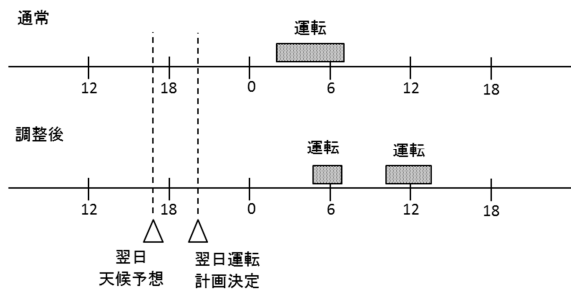


図-1 蓄湯式給湯器調整イメージ

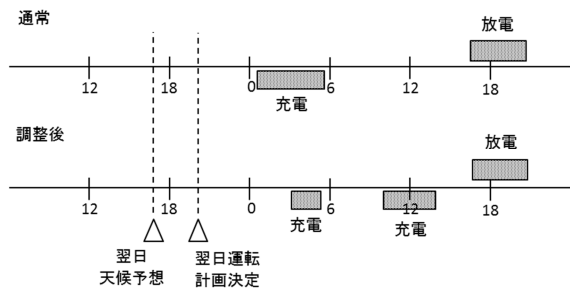


図-2 蓄電池調整イメージ

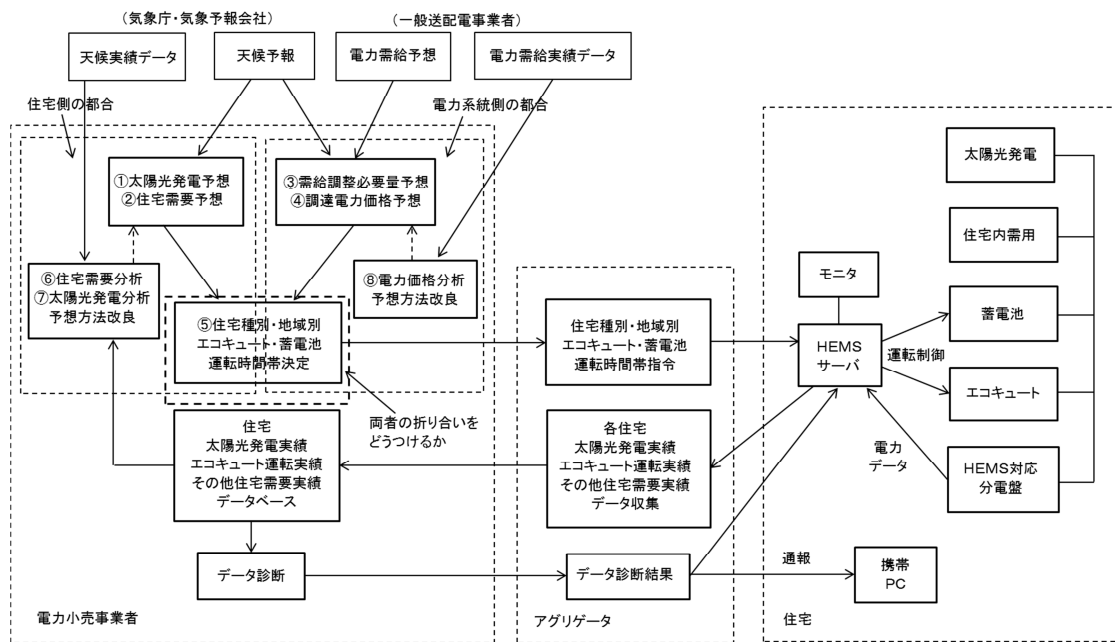


図-3 VPPサービス実施形態イメージ

研究担当者	多田安伸 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部)
キーワード	VPPサービス、HEMSサービス、EMS、蓄湯式給湯器、蓄電池
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp

[無断転載を禁ず]

脱硝触媒の耐摩耗性評価方法の検討

目 的

石炭火力発電所の排ガス中の窒素酸化物(NO_x)低減に用いられる脱硝触媒は、排ガス中に含まれるフライアッシュ(FA)の衝突により摩耗・損傷する。そのため、脱硝触媒の交換時には、触媒性能のみならず耐摩耗性も考慮し触媒選定を行う必要があるが、脱硝触媒の耐摩耗性を評価する公定法はない。本研究では、自社で比較的容易に脱硝触媒の耐摩耗性を相対評価できる試験方法を検討した。

主な成果

脱硝触媒の耐摩耗性を評価するために、サンドブラストを応用した摩耗試験装置を開発した。開発したサンドブラスト式摩耗試験装置を用いれば、バラツキが少なく比較的短時間で FA に対する脱硝触媒の耐摩耗性の評価を行える見通しが得られた。また、本装置により、銘柄や圧縮強度が異なる脱硝触媒の耐摩耗性を相対評価できることが判った。

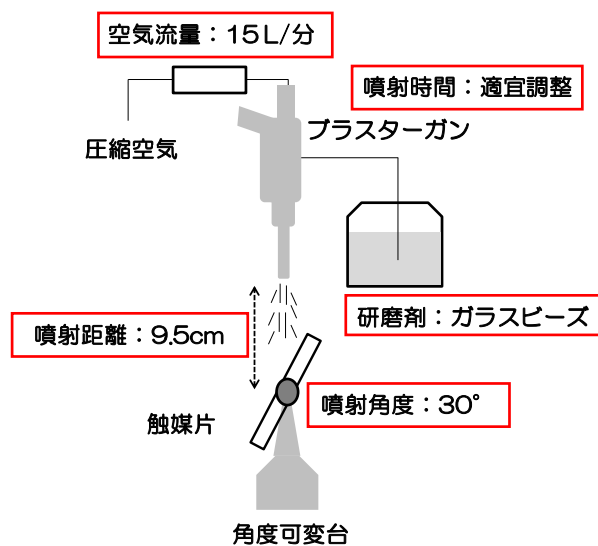


図1 サンドブラスト式摩耗試験装置の概略図

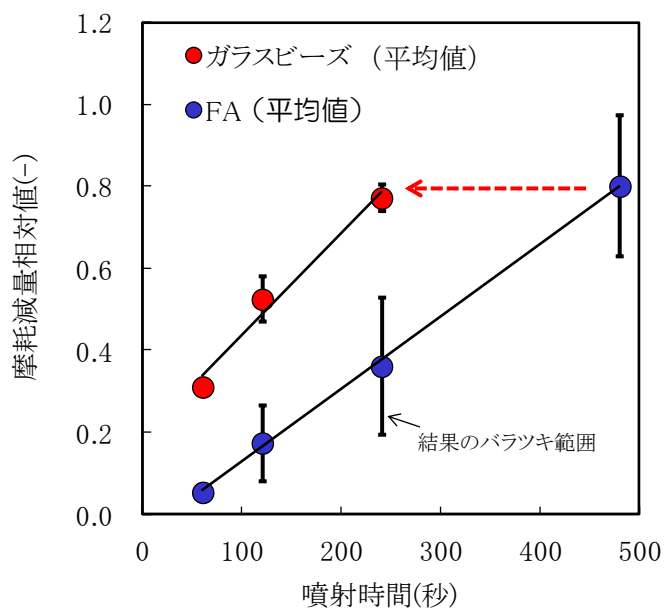


図2 FA とガラスビーズを用いた摩耗試験結果

研究担当者	山本 松平, 山地 豪, 横田 晃, 難波 正徳 (株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部)
キーワード	脱硝触媒、排煙脱硝装置、摩耗、サンドブラスト、フライアッシュ
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

電力建物における地震時の実挙動把握に向けた取組み

～地震観測等に基づく評価事例～

目 的

地震観測等に基づく地震時の実挙動把握に向けた取組みの一つとして、低層の事務所建物を対象とした事例を紹介する。観測で得られた加速度記録を用いることにより、建物に生じた変形量や作用した地震力の推定ができ、建物の損傷程度の判定が可能となり、安全性や継続使用性の定量的な評価につながることを示す。

主な成果

1. 固有振動数と減衰定数の評価

ARXモデルによるシステム同定の手法を観測された水平2方向の全加速度記録に対して網羅的に適用し、この建物の振動特性の振幅依存性と経年変化との有無を検討した。その結果、固有振動数についてはかなり明瞭な振幅依存性と経年変化が確認された。地震動の振幅が大きくなるほど固有振動数はわずかずつではあるが低下しており、経年変化については、長期間で見ると固有振動数がわずかずつ低下する傾向が見られた。減衰定数については、最大のもので約2%程度であり、固有振動数に比べてばらつきが大きく、振幅依存性や経年変化が固有振動数ほど明確には現れなかった。

2. 復元力特性等の評価

加速度記録から復元力特性を求め、層剛性、減衰定数等の評価を試みた。その結果は解析値とほぼ対応していたことから、この手法が地震後の損傷程度の確認に有効であることを示すことができた。

3. 限界耐力計算との比較

動的な特性を簡便に考慮できる解析である限界耐力計算の手法を適用し、その結果を観測記録と比較した。限界耐力計算から算定された応答値のうち、NS（短辺）方向は全般的に観測記録に比べて小さめの結果となった。この原因は、NS（短辺）方向の観測記録には基礎の回転による影響が多く含まれていることによると考えられる。

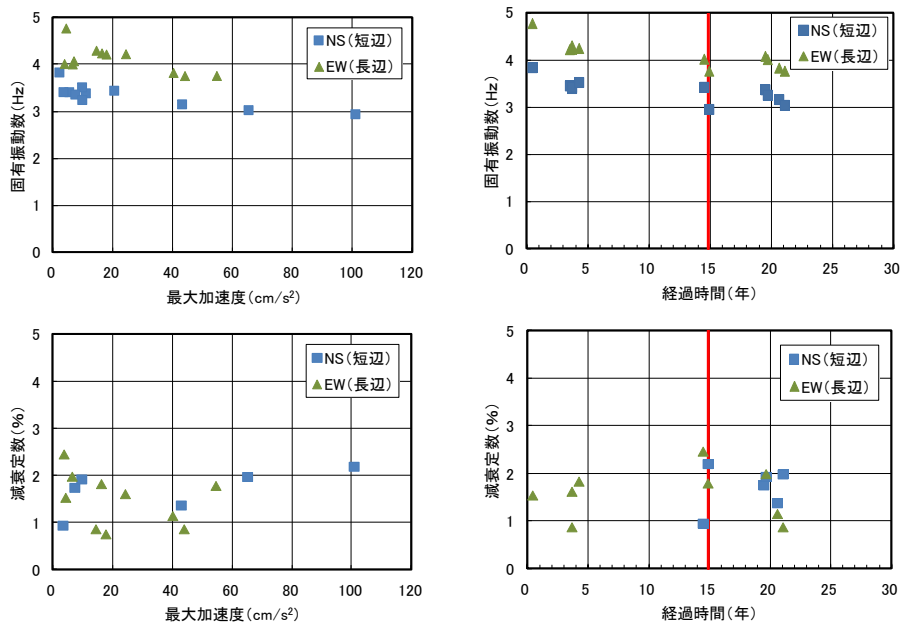


図1 固有振動数と減衰定数の振幅依存性と経年変化

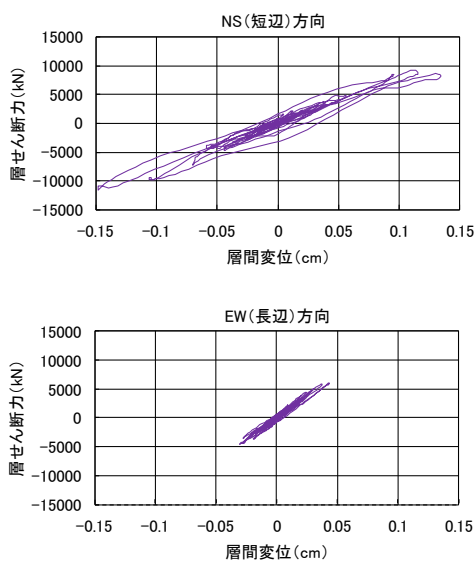


図2 復元力特性
(1995年兵庫県南部地震)

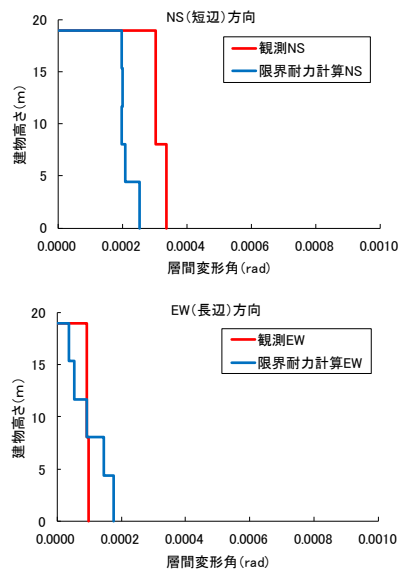


図3 限界耐力計算結果との比較
(1995年兵庫県南部地震)

研究担当者	松田耕作, 天野雄一郎 (土木技術部) 岡田将敏, 塩田哲生, 坂本潤哉 (四国電力)
キーワード	地震観測, 固有振動数, 減衰定数, システム同定, ARX モデル, 振幅依存性, 経年変化, 復元力特性, 層剛性, 層間変位, 限界耐力計算,
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@sken.co.jp http://www.sken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

長距離配電線に対応したメガソーラー発電の無効電力制御による電圧変動抑制の実証試験

目 的

配電系統にメガソーラー発電など大規模太陽光発電（PV）が連系された場合の電圧変動抑制対策としてパワーコンディショナ（PCS）の無効電力制御（力率一定制御）が導入されている。しかし、同制御は長距離配電線において線路電力損失変動の影響で PV 連系時の電圧変動が拡大し、PV が連系できない問題がある。

そこで本稿では、長距離配電線に PV が連系した場合の電圧変動を抑制する PCS の無効電力制御を提案し、実配電線にてその制御の電圧変動抑制効果を検証した。

主な成果

PV 連系時において配電線の電圧変動に影響を与える配電線負荷および PV 出力の 2 項目を PCS の無効電力制御に関する入力とし、これら 2 項目の変化に合わせて PCS より出力される無効電力を変化させた。

実配電線における検証の結果、出力 1.7MW の PV が亘長 12.8km の 6.6kV 配電線に連系する場合、従来の力率一定制御においては、PV 連系に伴う電圧変動幅が 3.5%（229V）に達していたが、提案手法の適用により電圧変動幅は 1.9%（128V）に抑制されていることがわかった。

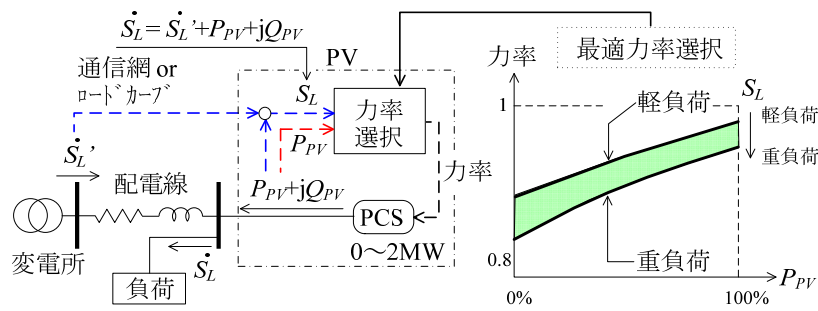


図1 提案手法の概念図

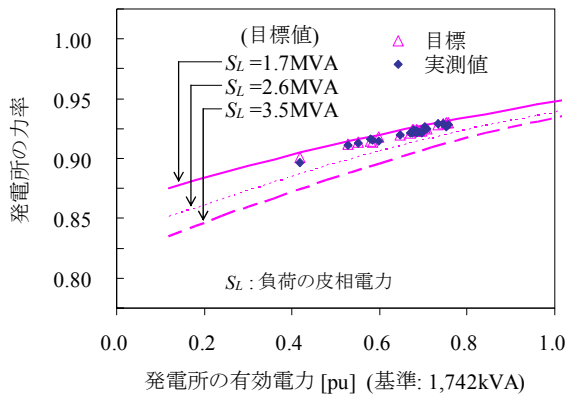


図2 発電所の有効電力と力率の関係 (ロードカーブ方式)

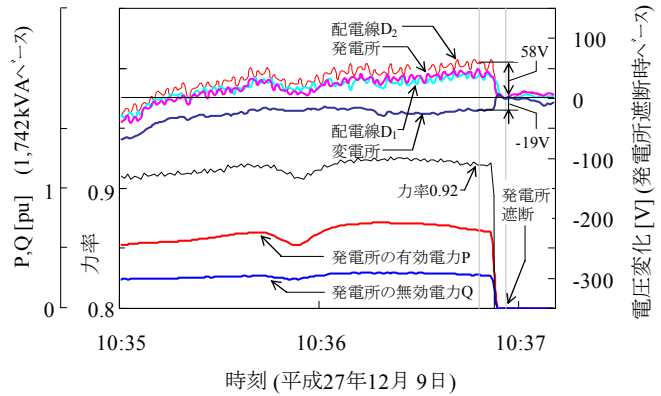


図3 発電所解列時の電圧変動 (ロードカーブ方式)

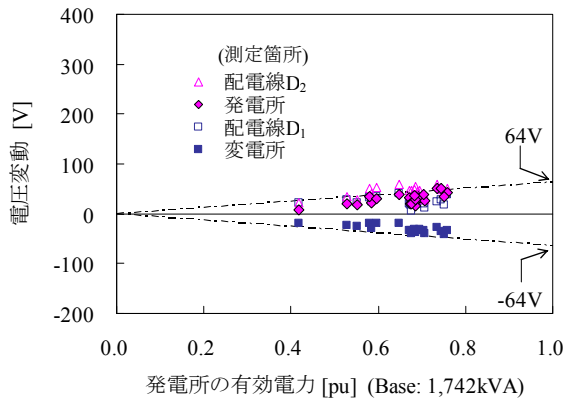


図4 発電所の有効電力と電圧変動の関係 (ロードカーブ方式)

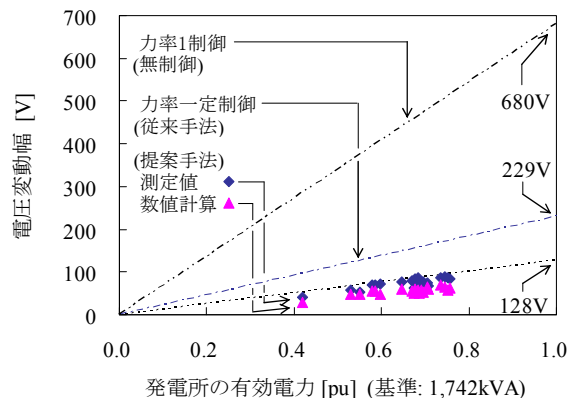


図5 発電所の有効電力と電圧変動幅の関係 (ロードカーブ方式)

研究担当者	河野 高一郎 (電力技術部)
キーワード	太陽光発電, メガソーラー, 配電線, 電圧変動, 電圧制御, 無効電力制御, 力率一定制御, パワーコンディショナ, PCS, 実証
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

架空送電線の鋼心腐食メカニズムに関する研究

目 的

架空送電線の電力線の経年に伴う腐食劣化は、海塩によるアルミ腐食がわずかに存在すると考えられていたが、近年、山間部に経過する送電線の撤去電線で、電線表面のアルミ線には異常がなく、内部の鋼心が腐食している事例が確認されている。

このため、電線の鋼心腐食のメカニズムを解明するとともに、鋼心腐食による電線の余寿命推定手法について研究を行い、電力の安定供給と設備保全の合理化をはかる。

主な成果

1. 鋼心腐食メカニズムの解明

山間部の撤去電線で確認された鋼心腐食の要因として、大気中物質の硫酸イオンが降雨、霧等を媒体として電線内部に取り込まれ、凝縮されたことで、鋼心腐食が発生したとの仮説を立てた。この仮説に基づき、腐食溶液組成（pH、硫酸、硫酸ナトリウム濃度）を調整することで、アルミ腐食が小さく鋼心腐食が大きい実線路での鋼心腐食状態が再現できることが分かった。

2. SO₂濃度測定と分布推定

鋼心腐食の腐食要因となる硫酸イオンの濃度測定を行うとともに、SO₂発生量と気象データから計算する ADMER プログラム（産業技術総合研究所）を用いて拡散計算を実施し、四国内1kmメッシュ毎の平均SO₂濃度を算定・マップ化した。

3. 腐食促進試験による電線劣化データの取得

サイズ（素線径、アルミ層数）の異なる3種類の電線（ACSR200mm²、410mm²、680mm²）の腐食促進試験・性能評価試験結果から、電線強度低下傾向・速度に関する基礎的なデータを取得した。

4. 電線腐食速度マップの作成

重回帰分析を用いて鋼心腐食を対象とした電線腐食速度マップ[ACSR330mm²]を作成し、電線の余寿命推定を可能とした。

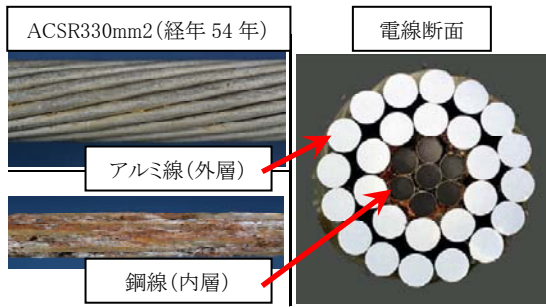
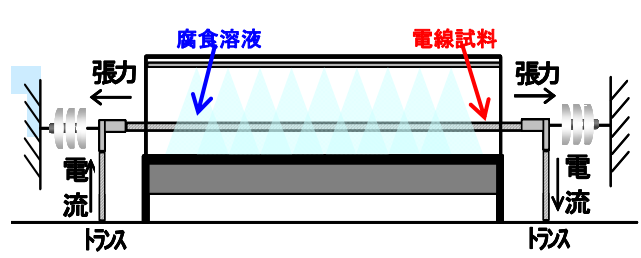


図1 撤去電線の鋼心腐食事例



(試験装置本体長 8m、電線試料有効長 6m)

図2 腐食促進試験装置の模式図

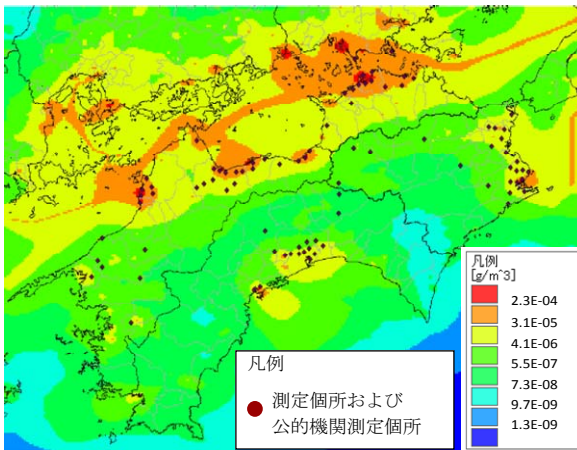


図3 SO₂濃度マップ (2000年ベース)

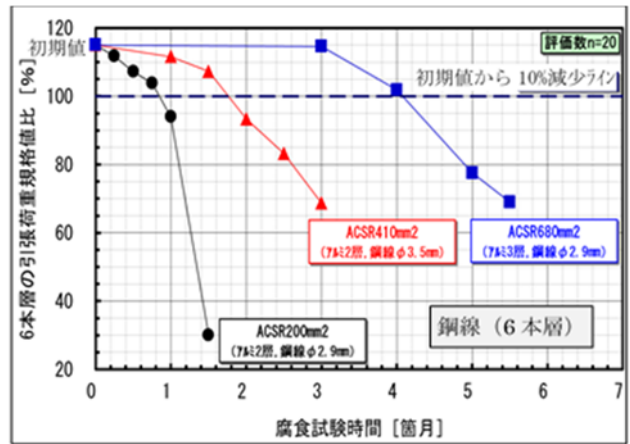


図4 鋼線の引張荷重残存率の変化

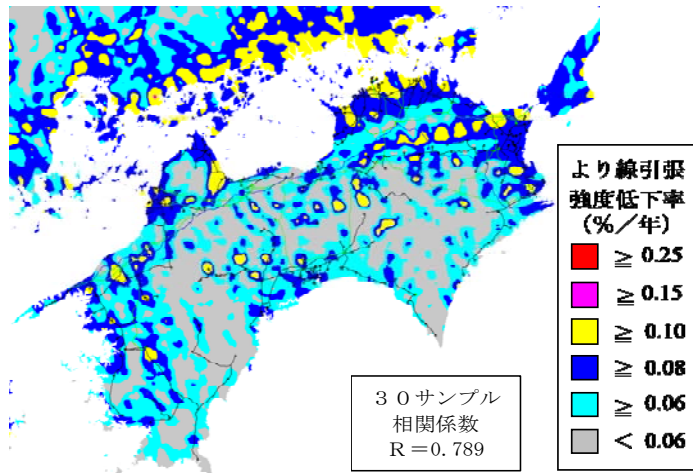


図5 電線腐食速度マップ (SO₂による鋼心腐食) [ACSR330mm²]

研究担当者	富永 能史 (四国電力株式会社 高知支店電力部送電課) 重井 政人 (四国電力株式会社 電力輸送本部送変電部) 藤川 真人 (株式会社四国総合研究所 電力技術部)
キーワード	架空送電線, 電力線, 鋼心腐食, 硫酸イオン, 腐食促進試験
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画営業部 事業管理課 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

蓄電池を含んだ直流回路の短絡地絡保護

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 多田 安伸

キーワード： HVDC

短絡保護
地絡保護
リチウムイオン電池
絶縁トランス

Key Words : High Voltage Direct
Current
Short circuit protection
Ground fault protection
Lithium ion battery
Isolation transformer

Short-circuit protection and ground fault protection for HVDC including batteries

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Dept.

Yasunobu Tada

Abstract

The short circuit current value of HVDC including batteries is very high, because the internal resistance value of battery is very low. It is very difficult to break large DC current. We investigated and studied about how to protect DC circuits from short circuit and ground fault. We measured the short circuit current and the voltage surges, the breaking time of the fuse and the breaker, and the detection sensitivity of the DC ground relays. We proposed the practical method of the short circuit protection and the ground fault protection for HVDC including batteries.

1. はじめに

再生可能エネルギー発電の増加により蓄電の必要性が増しており、規模の大きな蓄電装置が普及していくと考えられる。また、太陽光発電等の直流電力を蓄電池で調整して、需要家に直流で供給することも試みられている。これまで電気鉄道等極めて限定的であった直流の利用が、今後は蓄電池を核として様々な分野に広がっていくと予想される。

蓄電池の電圧は今のところ低圧（750V 未満）の範囲内の 500V 程度である。また、蓄電池を含んだ直流回路では、蓄電池の内部抵抗が極めて小さく限流特性がないため非常に大きな短絡電流が流れること、低圧回路であっても直流大電流の遮断は難しいことから、蓄電池を含んだ直流回路の短絡保護をいかに行うかは大きな課題である。

地絡保護に関しては、保護方式に密接に関係する接地方法も確定したものはないが、データセンタ直流給電¹⁾および電気自動車急速充電器²⁾の地絡保護が規格化され、事実上のスタンダードとなりつつある。

以上を踏まえ、蓄電池を含んだ直流回路の短絡・地絡保護の実験・検討を実施し、現状考えられる実用的な保護方式を提案することとした。

2. 短絡保護

2.1 短絡保護方式

500V 級直流に適用できる短絡電流遮断機器は、ヒューズ、気中遮断器（ACB）および配電用遮断器（MCCB）である。気中遮断器と配電用遮断器は、サイズは異なるが遮断原理は同じであり、本稿では小型の配電用遮断器で代表させる。最大遮断電流はヒューズで 100kA 程度、配電用遮断器で 40kA 程度となっている。

ヒューズは高速（数百 μ 秒以下）で大電流を遮断でき機器損壊防止に優れるが、熱的な制約から定常電流値は定格電流値の 80% 程度に低減する必要があり、また、定格電流値の 5 倍程度までの小電流は遮断できない特性を持っている³⁾。このことにより、長いケーブルを有するなど回路抵抗が大きく短絡電流が小さい回路にはヒューズを適用できない場合がある。

配電用遮断器は、電流による磁界を使ったアーク駆動機構によりアークを消弧グリッドで急速に冷却・消弧する構造となっている⁴⁾。過電流検出部に限時特性があること、機械的な作動部分があるため、遮断時間は長く（数十 m 秒）機器損壊防止には適さないこともあるが、小電流から大電流まで遮断可能である。また、

通常の負荷電流の遮断も可能であり開閉器としての機能も有する。

以上のヒューズおよび配電用遮断器の特性から、通常はヒューズが用いられる。開閉器機能が必要な場合やヒューズの適用が難しい箇所では配電用遮断器が用いられるが、ヒューズを併用するが多い。

2.2 鉛蓄電池を使った直流短絡実験

蓄電池を含む直流回路でのヒューズおよび配電用遮断器の遮断特性を評価するため、直流短絡実験を行った。直流用配電用遮断器には、遮断電流は比較的小さいが 1000V 程度まで使用できる太陽光発電向け仕様品と、遮断電流は大きい最大電圧は 500V 程度の蓄電池も含む一般向け仕様品がある。蓄電池を含む回路に使用する配電用遮断器は一般向け仕様品を使用するため、余裕を見て蓄電池電圧は 400V 程度とした。蓄電池は安全性や入手の容易さから一般的な 12V28Ah 自動車用鉛蓄電池を選定し、32 直列（384V）とした。

実験装置の構成を図-1 に示す。短絡の発生は投入器で行い、短絡時間を制限するために投入器入り後（短絡後）一定時間（500m 秒）後に遮断器を開放した（図-2）。投入器は電磁接触器を使用した。遮断器は通常の MCCB を使用（MCCB の遮断能力を高めるため 4 極の遮断器で正負それぞれ 2 極を使って遮断）し、外部信号により遮断させた。負荷は実ケーブルおよび模擬インピーダンスを使用した。

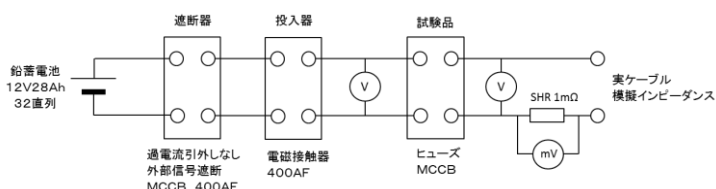


図-1 直流短絡実験装置構成

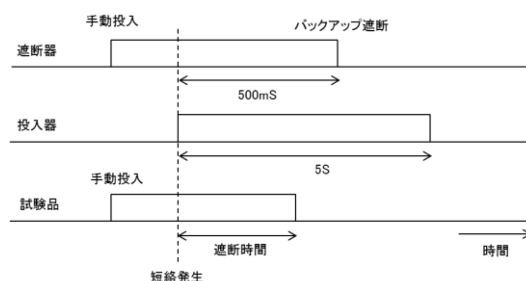


図-2 実験回路投入開放タイミングチャート

試験に使用したヒューズおよび MCCB の仕様を表-1 に示す。

表-1 実験に使用した機材

機器	仕様
ヒューズ	日之出電機製作所製 型式1000GH 定格電流20A
MCCB	三菱電機製 NF-125SV 4極 定格電流30A

実験に使用した負荷は、実ケーブル 20m と実ケーブルのインピーダンス測定結果から模擬した集中定数回路 (図-3) とした (表-2)。

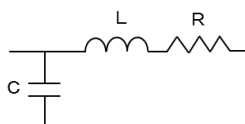


図-3 ケーブル模擬回路

表-2 実験に用いた負荷

ケーブル長	仕様
9.2m相当	模擬 R=25mΩ L=5.4μ H C=1.5nF
20m	キャブタイヤケーブル20m 14mm ² 2芯
24m相当	模擬 R=65mΩ L=14μ H C=3.5nF
56m相当	模擬 R=148mΩ L=32μ H C=9.5nF

2.3 鉛蓄電池を使った直流短絡実験結果

(1) 短絡電流の測定

実験装置の試験品部位を短絡し、ケーブルあるいはケーブル模擬回路を接続して短絡電流を測定した結果を図-4に示す。また、短絡電流の波形例を図-5、6に示す。端子短絡での短絡電流は1.24kA、電池電圧は410Vであった。これから推定される蓄電池も含めた実験回路の抵抗値は330mΩとなる。実験回路およびケーブルの抵抗値と電池電圧から求めた短絡電流値と実験結果は良く一致している。実験回路の抵抗値が大きいため、短絡電流は思いの外小さくなった。

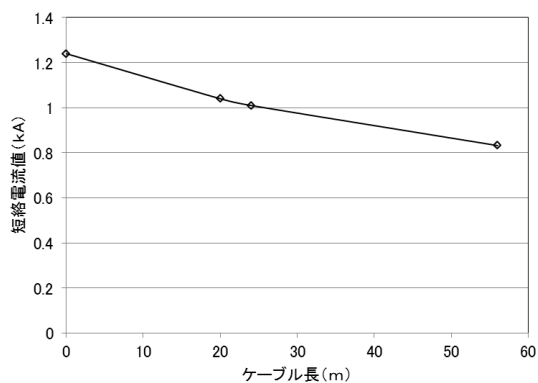


図-4 短絡電流測定結果

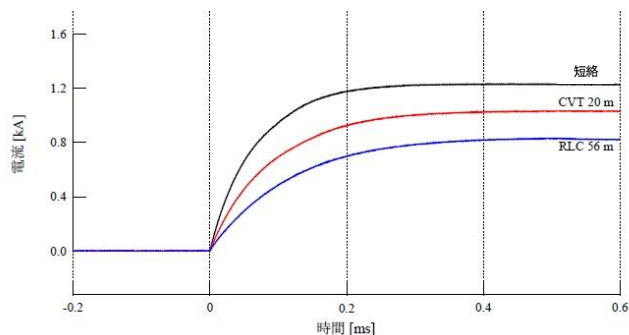


図-5 短絡電流波形例 (短時間)

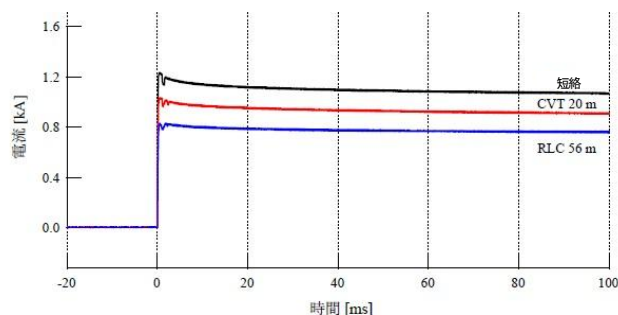


図-6 短絡電流波形例 (長時間)

(2) ヒューズ遮断実験

実験装置の試験品部位にヒューズを装着し、ケーブルあるいはケーブル模擬回路を接続してヒューズ遮断時間を測定した結果を図-7に、遮断時の過電圧最大値を図-8に、遮断時の電圧・電流波形例を図-9に示す。ケーブル長が長くなるにつれ電流値が小さくなるため遮断時間が長くなっている。電源側の過電圧はケーブルが長くなるに伴い電流の変化率が小さくなっているため減少しているが、負荷側の過電圧は負荷側のインダクタンス分増加により増加している。ヒューズは遮断速度が速い分電池電圧の2倍程度の過電圧が発生しており、回路のインダクタンスが大きい場合は過電圧対策が必要である。

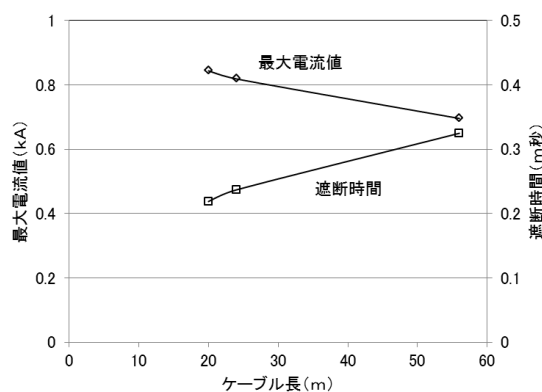


図-7 ヒューズ遮断特性

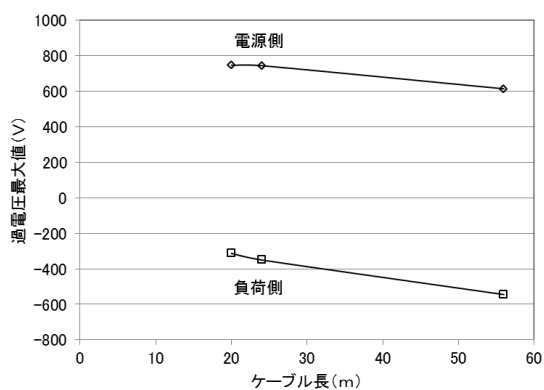


図-8 遮断時の過電圧最大値

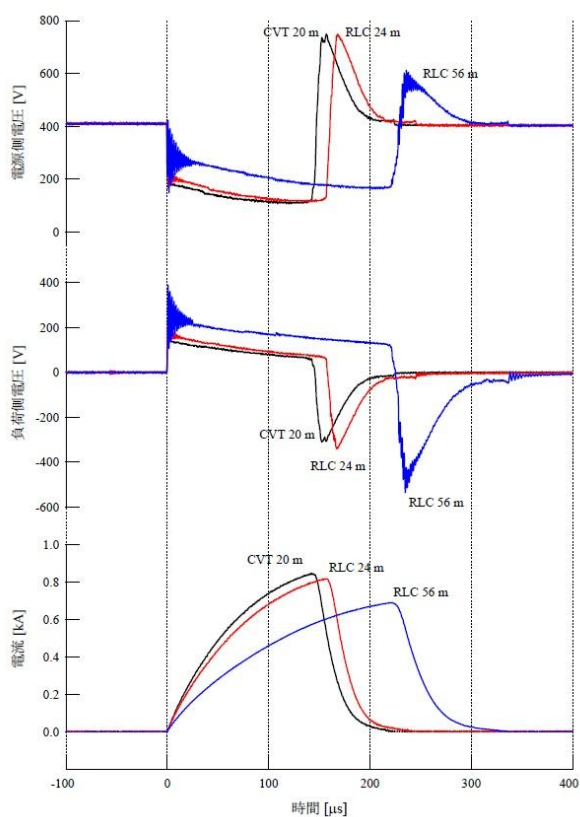


図-9 遮断時の電圧・電流波形例

(3) 配電用遮断器遮断実験

実験装置の試験品部位に配電用遮断器を装着し、ケーブルあるいはケーブル模擬回路を接続して配電用遮断器遮断時間を測定した結果を図-10に、遮断時の過電圧最大値を図-11に、遮断時の電圧・電流波形例を図-12に示す。ケーブル長が長くなるにつれ電流値が小さくなるため限時特性により遮断時間が非常に長くなっている。遮断時間はヒューズに比べて2桁以上長く非常に遅い。また、電流が減少し始めて切れるまでの間の電流減少率は、ヒューズが -20 kA/m 秒 程度に対して配電用遮断器は -0.5 kA/m 秒 程度と小さく、

これに伴い過電圧も非常に小さくなっている。特に電源側では尖塔状の過電圧は発生しているが、電池電圧低下と相殺して結果的に過電圧最大値は電池電圧と同じ（過電圧発生なし）になっている。配電用遮断器は遮断速度が遅いがその分過電圧の発生は抑えられており、過電圧対策は不要である。

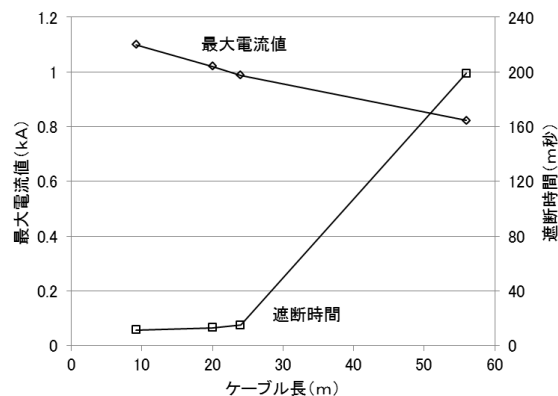


図-10 配電用遮断器遮断特性

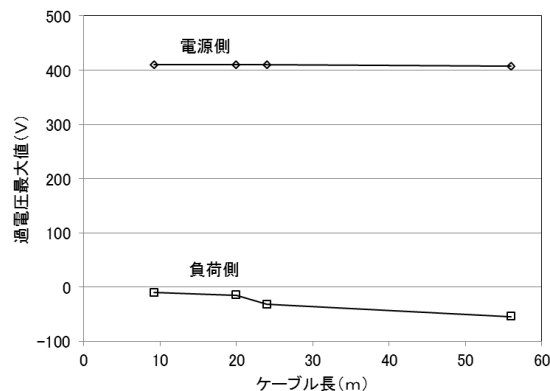
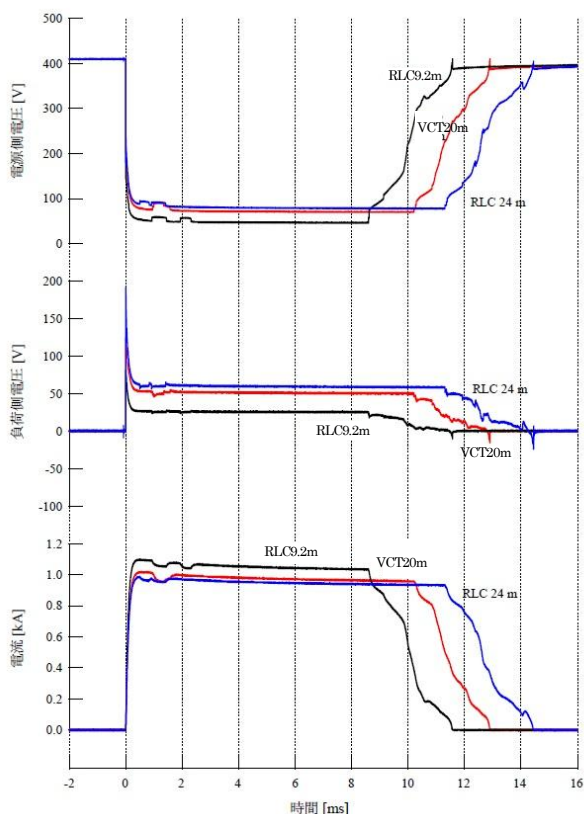


図-11 遮断時の過電圧最大値



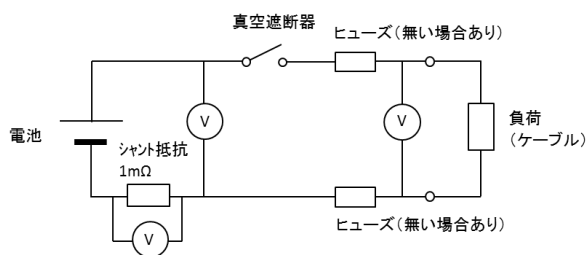
図－1 2 遮断時の電圧・電流波形例

2.4 リチウムイオン電池を使った直流短絡実験結果

(1) 短絡電流の測定

リチウムイオン電池は、内部抵抗が極めて小さく短絡電流がかなり大きくなることが予想されることから、短絡実験を行った。リチウムイオン電池は短絡継続時に火災発生の恐れがあるため、少ない電池容量で実験を行った。電池は大型蓄電池によく使われている電池の単セル (2.3V20Ah) を選定し、12 直列 (27.6V) とした。短絡電流遮断機器はヒューズのみとした。鉛蓄電池を使った直流短絡実験において負荷を集中定数回路とした際に振動が目立ったため、すべて実ケーブル (VCT14m² 芯) として長さは 5, 10, 20m とした。

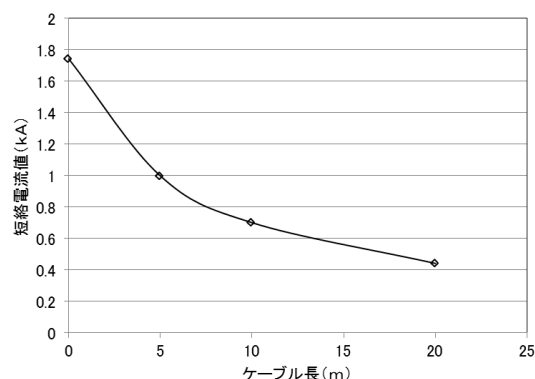
実験装置の構成を図－1 3 に示す。短絡開始および短絡電流遮断に用いる開閉器は 6kV 用高速動作真空遮断器 1 台で両機能を持たせた。



図－1 3 実験装置構成

真空遮断器は閉後 500m 秒後に開放し、短絡電流の継続を防止した。

負荷にケーブルを接続してヒューズを装着せず (端子短絡) に短絡電流を測定した結果を図－1 4 に示す。なお、ケーブル長 0m は安全のため実験は行われなかったが、実験結果から求められた実験回路の抵抗値 17.5 mΩ および電池電圧 30.5V から推定した。



図－1 4 短絡電流測定結果

短絡実験において、単セルの端子電圧を測定しその低下から単セルの内部抵抗値を測定したところ 0.68 mΩ であった。同じ単セルを JIS 法 (電流値 0.2C および 1C の電圧差から測定) で内部抵抗値を測定した結果は 1.24mΩ であり、短絡時はこの約半分となっている。これは、短絡電流の大きさは JIS 法で測定した内部抵抗値で推定される値よりかなり大きく、短絡実験をしないと正確な値はわからないことを示している。短絡保護のために短絡容量は正確に知る必要があるが、そのためには短絡実験が必要ということになる。

(2) 電池モジュールの短絡電流の推定

大型のリチウムイオン電池は、複数の単セルを接続して制御監視装置を付加した電池モジュールを多数組み合わせて構成されており、電池モジュールが基本構成要素となっている。実験に使用した単セルの電池モジュールは 12 直列 2 並列構成となっており、短絡実験結果から電池モジュールの短絡電流を推定した。

単セルを 12 直列している実験装置の接続抵抗値は 0.55mΩ であった。これと単セル内部抵抗測定値から短絡時の電池モジュール内部抵抗値は下記のとおり推定される。

$$(0.68 \times 12 + 0.55) \div 2 = 4.4 \text{ m}\Omega$$

電池モジュール実機の内部抵抗値を JIS 法で測定した結果 (一部結線の抵抗分を含む) は 11mΩ で、短絡時の推定値はこの測定値の約半分となっており、単セルの短絡時内部抵抗値が JIS 法測定値の約半分であるこ

とと整合している。

電池電圧は、

$$2.3 \times 12 = 27.6 \text{ V}$$

電池モジュール端の短絡電流は

$$27.6 / 4.4 = 6.3 \text{ k A}$$

電池モジュールの短絡電流は 6 k A 程度と推定され、ヒューズで遮断可能な電流値である。

実際の大型蓄電池は電池モジュールを多数直列しており、短絡電流は非常に大きな値になることから、短絡保護用のヒューズは直列回路毎に設置する必要がある。

(3) ヒューズ遮断実験

鉛蓄電池短絡実験と同じヒューズ（定格電流 20 A）で遮断実験を行った。実験結果（5 回の平均値）を表 3 に、遮断時の電圧・電流波形例を図 15 に示す。ヒューズの遮断は非常に不安定で、ケーブル長 20 m では 500 m 秒以内に遮断しないケースがあった。短絡電流は約 400 A で、ヒューズの定格電流 20 A の約 20 倍であるのに遮断しなかった理由として、回路電圧が低いことが考えられる。鉛蓄電池短絡実験と比べて電流値が小さい分遮断時間は長くなっている。また、回路の電線・ケーブル長が短くインダクタンス分が小さいため、過電圧最大値は鉛蓄電池短絡実験よりかなり小さくなっている。

表 3 短絡実験結果

ケーブル長 (m)	遮断時間 (m秒)	電流最大値 (A)	過電圧(V)	
			電源側	負荷側
5	0.521	516	167	-52
10	0.66	468	109	-58

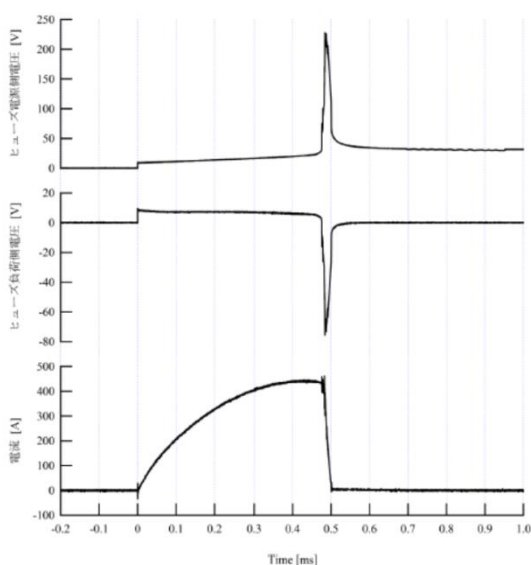


図 15 遮断時の電圧・電流波形例

2.5 ヒューズと配電用遮断器の適用方法

(1) 特性と適用方法

ヒューズと配電用遮断器の直流短絡電流遮断機器としての特性は下記のとおりである。

ヒューズ

- ・高速遮断性能に優れる。回路のインダクタンスが大きい場合は過電圧が発生するため、過電圧対策として SPD（サージ保護素子）等の設置が必要である。
- ・定格電流の 5 倍程度までの比較的小さい電流は遮断できない。

配電用遮断器

- ・遮断速度は遅い。その分遮断時に過電圧は発生しない。
- ・小電流から大電流まで遮断可能である。開閉器としての機能も有する。

以上の特性から、短絡許容時間の短い半導体機器等にはヒューズが必須である。最近の直流機器はほとんどで半導体機器が使われていることから、ヒューズは必須と言える。一方でヒューズは比較的小さな電流の遮断ができないことから、ケーブルの先に負荷のあるフィード回路など短絡電流の小さい回路ではヒューズだけでは短絡保護ができず、配電用遮断器の適用あるいは併用が必要である。すなわち、IGBT、FET 等個別の部品保護には個々にヒューズを使用し、機器取り合いやフィードには開閉器を兼ねて配電用遮断器を設置することが現実的と考えられる。図 16 に短絡保護の構成例を示す。フィードは配電用遮断器だけでも保護可能であるが、ヒューズがないと先に蓄電池のヒューズが溶断する可能性があるため、保護協調上ヒューズを使用することが望ましい。

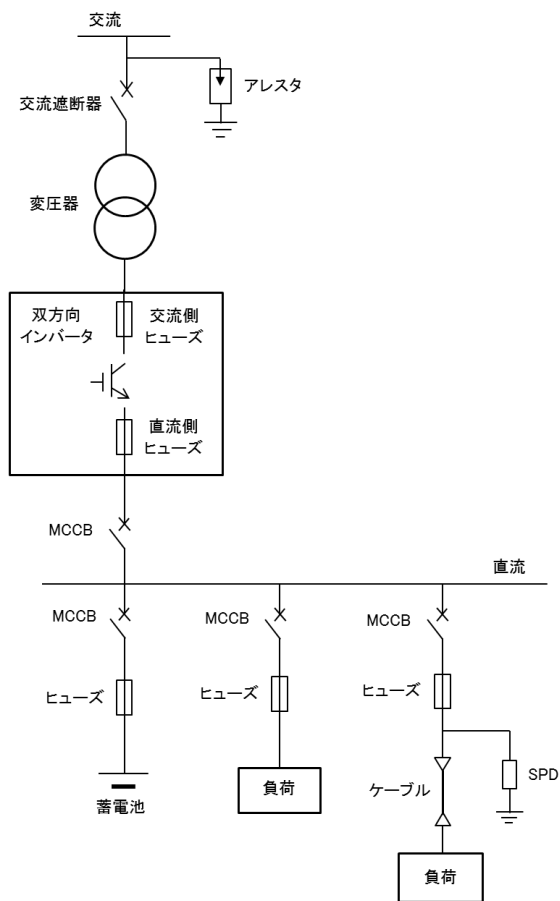


図-1 6 直流短絡保護回路例

(2) フィーダ回路の短絡保護

ヒューズは小電流では遮断できない（遮断には定格電流の5倍以上の電流が必要）ことと、常時の負荷電流はヒューズの定格電流の80%程度に低減する必要があることの双方を満たすためには、

負荷電流 $\div 0.8 \times 5 =$ 負荷電流 $\times 6.25 <$ 短絡電流
ヒューズの適用には、概ね短絡電流 \div 負荷電流 >10 の条件が必要である。負荷へのケーブルが長いフィーダ回路では、ケーブル抵抗により短絡電流が制限され、短絡保護の制約から負荷電流が制限される。今回使用した鉛蓄電池で短絡保護にヒューズを使用した場合のケーブルの距離と最大の負荷電流の関係を求める。

短絡前の電池電圧410V、短絡電流1.24kAであるのでケーブルを除いた回路の抵抗値は、

$$\text{内部抵抗値} = 410 \div 1240 = 0.33 \Omega$$

ケーブル（14mm² 2芯）の抵抗値は、2.6m Ω /m（往復）

ケーブル長Xmの短絡電流は下記式のとおりであり、

$$\text{短絡電流値} = 410 \div (0.33 + 0.0026 \times X)$$

ケーブル長と短絡電流の関係を図-1 7に示す。

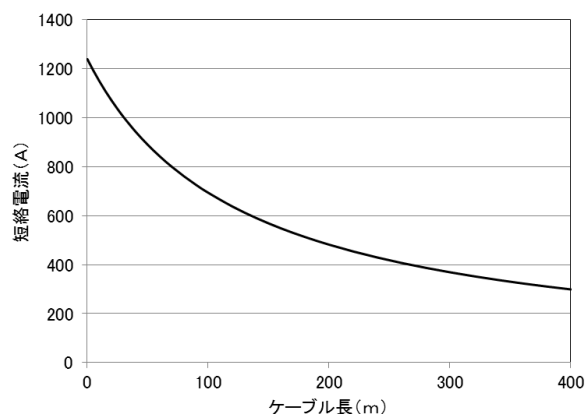


図-1 7 ケーブル長と短絡電流の関係（計算値）

ケーブル長400mで短絡電流は300Aであり、負荷電流は30Aが上限となる。なお、負荷電流30Aでのケーブルの電圧低下は31Vとなり低下率は7.6%で問題ない。このケーブルの温度制限による許容電流は70Aであり、短絡電流 \div 負荷電流 >10 の関係から短絡電流700Aのケーブル長は約100mで、許容電流まで負荷電流を流せるのはケーブル長100mまでとなる。

このようにヒューズで保護を行う場合は、電源の内部抵抗値やケーブルの特性、負荷電流等を個別に組み合わせ合わせて検討する必要がある、かなり複雑になる。また、条件によっては短絡電流 \div 負荷電流 >10 の関係が満たせず、ヒューズを適用できない場合もあり得る。

ヒューズの適用が難しい場合は、配電用遮断器を適用する必要がある。ただし、配電用遮断器は短絡発生から遮断するまでの時間が非常に長いことに注意が必要である。

3. 地絡保護

3.1 直流回路の接地方式

直流回路の接地方式として下記が採用されている。

（図-1 8）

① 1線直接接地

正極・負極のいずれかを直接接地する。地絡は短絡となり地絡電流が大きい。正極接地の電蝕が少ない。異常電圧は小さくなるため、高圧回路で使用される。

② 1線抵抗接地

正極・負極のいずれかを抵抗を介して接地する。地絡電流を制限できる。低圧回路（通信用48Vなど）では一般的。

③ 中間点抵抗接地

2個の抵抗器を使って正極・負極の中間点を形成し、中間点を接地する。線路対地電圧を半分にて感電時

の危険性が減少する。比較的電圧の高い（100V以上）低圧回路で採用されている。

④非線形抵抗接地

太陽光発電等異常電圧の発生する可能性は高いが、極力地絡電流は流したくない場合に、各線を SPD（サージ保護素子）で接地する方法がとられる。通常は非接地であるので地絡電流は流れないが、雷サージ等異常電圧発生時は SPD で異常電圧を大地に逃がして機器を保護する。

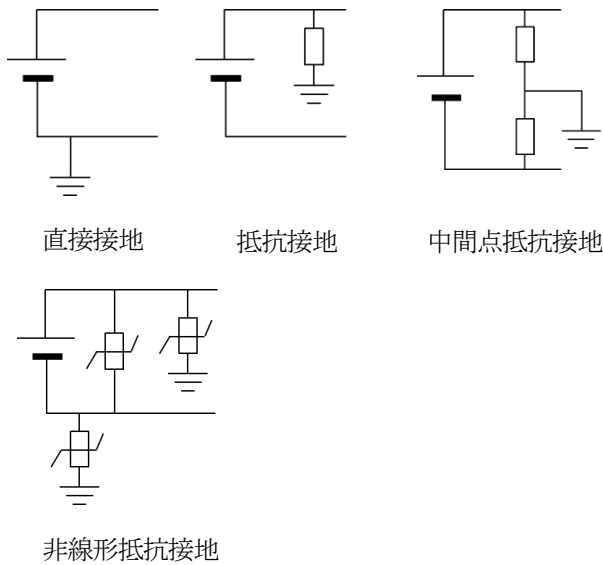


図-18 直流回路接地方式

人体が直流に感電した場合の反応（IEC60479-1）を図-19に示す。人体に対する地絡保護として、地絡電流をカテゴリ-2以下に抑制することが推奨されている。

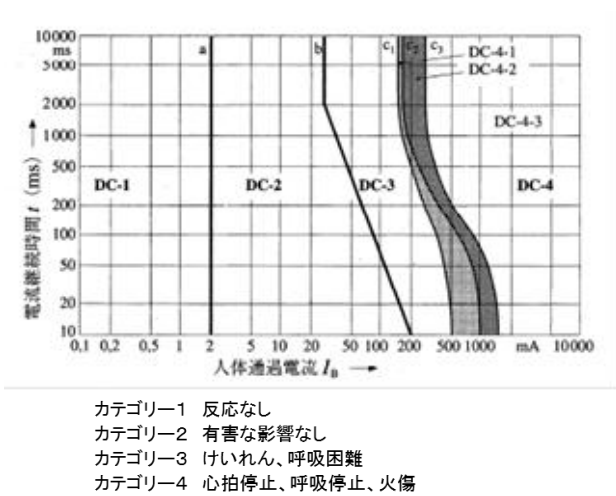


図-19 直流に感電した場合の人体の反応

データセンタの直流給電規格¹⁾では、接地方式は中間点抵抗接地を採用し、接地抵抗値は地絡電流が20mA未満になるよう選定される。電源電圧400V、地絡電流10mAとすると接地抵抗値は正極側負極側とも、 $400/0.01=40\text{ k}\Omega$

となる。あわせて地絡検出装置の設置を推奨している。

3.2 直流回路地絡検出方式

直流回路の地絡検出は基本的に交流回路の地絡検出と同じであり、下記方式が用いられる。

①接地点地絡電流検出

接地点で地絡電流を検出する方法。地絡電流を直流CTで検出する方法（地絡過電流）と接地抵抗の両端電圧上昇を検出する方法（地絡過電圧）がある。中間点抵抗接地の場合は、地絡時に接地抵抗両端電圧が変化することをを使って正極・負極のいずれかで地絡が起きているかの判別が可能である（図-20）。

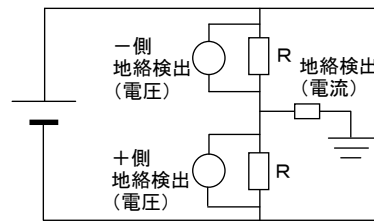


図-20 接地点地絡電流検出方式（中間点抵抗接地）

装置は簡単で感度の高い地絡検出が可能であるが、どこで地絡が起きているかの検出ができない。検出感度1mAの製品が市販されている。

②正負電流差分検出

フィーダ回路で直流CTにより正極電流・負極電流の差分を検出する方法。交流での零相CTによる地絡検出と同じ。フィーダごとの設置など複数の設置が可能で地絡場所の特定に活用できる。ただし、直流差電流検出感度は原理上交流に比べて悪く、検出回路も交流に比べて複雑である。このため、交流の漏電遮断器に相当する製品は市販されていない。地絡電流検出器として、直流差電流検出用CTを使った検出感度数mAの製品が市販されている（図-21）。

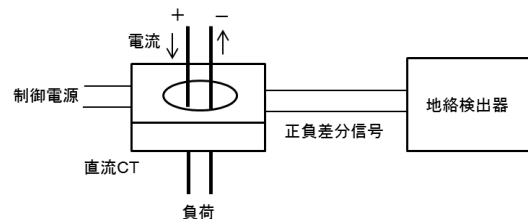


図-21 正負電流差分検出方式

直流回路の地絡検出には、一般的には接地点地絡電流検出方式を適用することで十分と考えられる。地絡箇所の特定が必要な場合は、必要箇所に正負電流差分検出方式を追加する。

電気自動車の急速充電器規格²⁾においては、感電防止策として

- ・絶縁トランスによる交流系と直流系の分離および直流系の非接地
- ・地絡検出器による地絡検出で装置電源遮断が規定されている。地絡検出器として、中間点抵抗接地地絡電流検出方式が推奨されている。対応商品の仕様では、正負接地抵抗値は40kΩ、地絡電流検出感度は1mA、検出時間は1秒以内となっている。地絡検出器の設置により実質中間点抵抗接地となっており、電源電圧は最大500Vなので、接地抵抗値40kΩより最大地絡電流値は12.5mAとなる。

電気自動車急速充電器と同様に、直流回路はほとんどの場合変換器を通して交流回路と接続されている。交流-直流間が絶縁されていないと地絡電流が回り込み、地絡検出の誤動作・誤不動作を起こすことがある。

小型太陽光発電の変換器(PCS)は非絶縁型がほとんどであり、直流地絡電流が交流側に流れ込む⁵⁾(図-22)。この場合は、交流側の漏電遮断器に直流が重畳し、漏電遮断器の地絡検出感度が低下する。

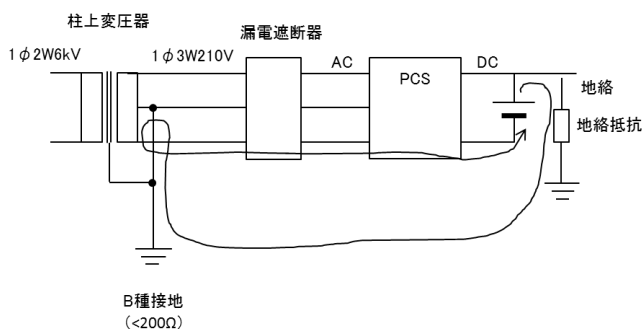


図-22 直流地絡電流の回り込み

交流-直流接続部には絶縁変圧器を設置するか変換器を絶縁型(高周波絶縁)として、地絡電流の回り込みを防止することが望ましい。同様に直流回路内においても、太陽光発電や直流負荷等地絡が予想される機器を接続するDC-DCコンバータ等変換器は絶縁型とするか、できない場合は正負電流差分検出方式の地絡検出器設置が望ましい。

3.3 直流地絡検出器の実際

400V級直流に適用可能な市販地絡検出器の例を表-4に示す。タイプ①は接地点地絡電流検出方式、タ

イプ②は正負電流差分検出方式を示す。

表-4 直流地絡検出器の例

装置名	タイプ	電圧範囲(V)	検出感度(mA)	動作時間(秒)	備考
S社 SDL0A-1A-E	①	50~500	1	1以下	接地抵抗内蔵
H社 RNC-500A-TB	①	50~500	1	1以下	接地抵抗内蔵
H社 VG-NF1	①	24~500(1点)	10	1以下	接地抵抗内蔵
H社 RDB-50	②	~1000	30	0.1	直流CT内蔵
H社 RDC-1+ZDM	②	~600	3	1以下	別置直流CT

正負電流差分検出方式の地絡検出器は、接地回路に設置すれば地絡電流の検出により接地点地絡電流検出方式の地絡検出器としても利用でき汎用性が高い。ただし、感度が劣ること、高価であること、長距離ケーブルへの直流通電時のケーブル静電容量への充電電流で誤動作することがあること(充電電流は短時間で減衰するためタイマーで逃がすか、地絡電流検出感度を低くすることで対応)、直流差電流検出用CTは許容電流以上の電流を流すと残留磁気により正確な検出ができなくなるなどデリケートな製品であることを理解して使用する必要がある。両タイプの特徴を表-5に示す。

表-5 直流地絡検出方式の比較

項目	接地点地絡電流検出方式	正負電流差分検出方式
地絡電流検出感度	中~高(1~10mA)	低~高(3~30mA)
地絡検出時間	中(1秒)	中~速(0.1~1秒)
設置箇所	接地点のみ	接地点、フィード等自由度高
地絡箇所特定	特定できない	フィード単位で特定可能
1回路設置可能数	1個	複数可能
動作原理	単純	複雑
耐ノイズ	強い	やや弱い
接地抵抗	通常内蔵	外付け
価格	安価	高価

実験室に400V級直流実験回路を設置し、表-4に示す直流地絡検出器の検出感度や動作時間を測定した。特性測定回路の例を図-23に示す。測定結果はすべて仕様を満たしていた。

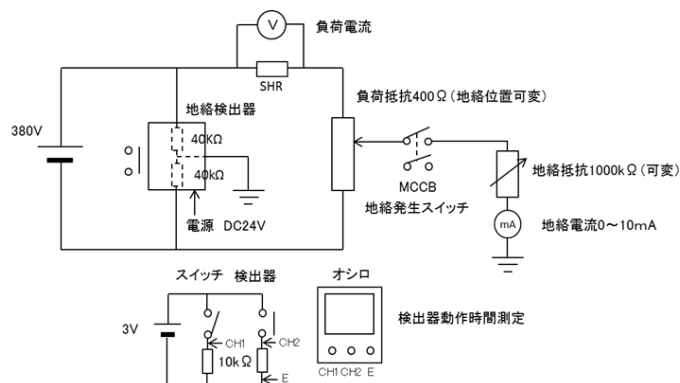


図-23 直流地絡検出器特性測定回路例

地絡検出による回路の遮断については、現状では下記のようになっている。

- ・電気自動車急速充電器など地絡発生時に人身の感電が予想される場合は、直ちに電源遮断する。
- ・データセンタ電源など遮断ができない回路では、接地抵抗を大きくして人身の感電事故時にも人体に影響を与えるような電流が流れないようにして安全を確保し、電源遮断は行わない。

以上のことから、実回路での直流地絡検出は下記の方針で行えば良いと考えられる。

- ・地絡を検出するために、高抵抗接地を行う。地絡電流が安全な 10mA 程度になる抵抗値を選定する。接地方式は中間点抵抗接地が望ましい。
- ・直流地絡発生を検知するために、接地点地絡電流検出方式の地絡検出器を必ず設置する。
- ・回路構成が複雑で特定機器やフィーダの地絡を検出する必要がある場合は、正負電流差分検出方式の地絡検出器を必要箇所に設置する。

また、地絡発生時の対応は通常は下記の方針で十分と考えられる。

- ・接地抵抗値を大きくして感電時の人身への影響が無視できるレベルに地絡電流を制限し、地絡発生時に電源遮断は行わない。

接地抵抗値を大きくすると接地のサージ電圧低減効果が無くなるため、サージ電圧対策は SPD を設置するなど別途実施する必要がある。直流地絡保護回路の例を図-24 に示す。直流母線には接地点地絡電流検出方式の地絡検出器を設置する。地絡発生の可能性が高い外部接続機器には正負電流差分検出方式の地絡検出器を設置する。なお、絶縁型の変換器は外部から地絡電流が流れ込まないため、地絡検出器は不要である。また、外部機器を接続するフィーダにはサージ電圧対策用の SPD を設置する。

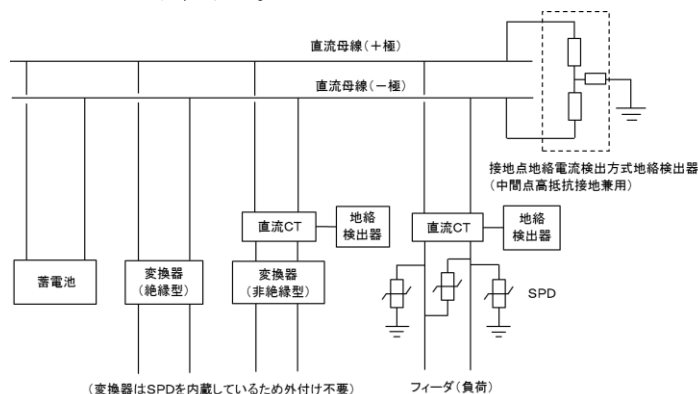


図-24 直流地絡保護回路の例

4. まとめ

・直流短絡保護には、ヒューズおよび配電用遮断器（気中遮断器含む）の適用が可能である。ヒューズは、遮断時間は短いが定格電流の5倍程度までの小電流を遮断できない。短絡電流が小さい場合はヒューズを適用できない場合がある。配電用遮断器は、全領域の電流を遮断できるが遮断時間が長い。また、開閉器としての機能を有している。ヒューズ、配電用遮断器それぞれ一長一短があるため、併用（場合によっては直列使用）することが望ましい。

・リチウムイオン電池の短絡電流値は、通常の JIS 法による内部抵抗値測定結果から予想される電流値よりはるかに大きく（今回実験に使用した電池では約2倍）、短絡電流を正確に知るためには短絡実験を行う必要がある。

・100V を超える低圧直流回路の接地方式は、対地電圧を半分に抑制できる中間点高抵抗接地が一般的であり、人体感電時の安全確保のため、地絡電流を 10mA 程度に制限できる抵抗値が選択される。地絡電流を低く制限した場合は、地絡発生時に回路を遮断しなくても良い。

・直流地絡検出装置として、接地点地絡電流検出方式と正負電流差分検出方式がある。接地点地絡電流検出方式は地絡検出感度が高いが、地絡発生場所の特定ができない。正負電流差分検出方式は地絡検出感度はやや低い、フィーダ単位で地絡発生場所の特定が可能である。直流回路全体の地絡発生を検知するために、接地点地絡電流検出方式の地絡検出器を必ず設置し、回路構成が複雑で特定機器やフィーダの地絡を検出する必要がある場合は、正負電流差分検出方式の地絡検出器を必要箇所に設置することが望ましい。

・地絡電流の回り込みを防止するため、交流-直流変換器には絶縁変圧器を設置するか、変換器を絶縁型（高周波絶縁）にする必要がある。直流回路においても太陽光発電や直流負荷等が予想される機器を接続する DC-DC コンバータ等変換器は絶縁型とすることが望ましく、できない場合や変換器が無い場合は正負電流差分検出方式の地絡検出器設置が望ましい。

5. むすび

データセンタにおいて、省エネのために 400V 級直流給電が採用されており、大容量負荷回路では初めての本格的な直流配電の普及となっている。最近の電機電子機器はほとんどが内部で交流を直流に変換し直流

で動いており、また、太陽光発電や蓄電池の普及により、ますます直流の親和性が増している。今後は住宅内など身近なところへの直流配電導入も十分考えられるようになってきた。

一方で、直流の大電流遮断の難しさという課題は残されたままである。高性能蓄電池の導入で短絡電流は非常に大きくなっており、電流遮断の課題解決はますます重要になっている。

このような状況下で、400V直流やりチウムイオン電池の短絡実験を実施し、短絡電流の状況や遮断特性を評価した。また、地絡保護に関する実験や検討を行った。本報告が直流配電導入検討の一助になれば幸いである。

直流短絡保護は未だに古風なヒューズが主流であり、開発が進められている半導体デバイスを使った直流遮断装置の早期実用化が待たれる。

[謝辞]

鉛蓄電池およびリチウムイオン電池を使った短絡実験は、一般財団法人電力中央研究所電力技術研究所に依頼して同所横須賀研究所内で実施した。実験等に多大な労力をかけていただいた関係各位に深く御礼申し上げます。

本研究は四国電力株式会社経営企画部よりの委託により実施されたもので、関係各位に深く感謝する。

[参考文献]

- 1) 情報通信技術委員会 TTC 標準 JT-L1200
電気通信および ICT 装置の入力端における 400V までの直流給電インタフェース
- 2) CHAdeMO 協議会 CHAdeMO 方式電気自動車急速充電器規格
- 3) 株式会社日之出電機製作所技術資料
ヒューズの選定について
- 4) 富士電機技報 2014vol. 87no3
直流高電圧用ブレーカの無極性遮断技術
- 5) 電力中央研究所報告 R11035
太陽光発電自立運転時の特性評価

VPP技術を使った新たな住宅向けサービス

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 多田 安伸

キーワード： V P Pサービス
H E M Sサービス
E M S
蓄湯式給湯器
蓄電池

Key Words : Virtual Power Plant
Service
Home Energy Management
Service
Energy Management
System
water storage type
water heater
battery

The new residential services with Virtual Power Plant technology

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Dept.
Yasunobu Tada

Abstract

The Virtual Power Plant technologies that control many home devices remotely are in development for effective utilization and home use of solar photovoltaic generation.

To control the operating time zone of energy storage devices like hot water storage type water heaters and batteries is highly effective and realistic.

Old water heaters that don't support network are controlled by power switches adaptive to network. Old heat pump type water heaters that don't support network and switch control can't be controlled remotely.

Small size batteries are very expensive, the sharing of large scale batteries that are relatively inexpensive is recommended.

1. はじめに

小型太陽光発電（10kW未満）の再生可能エネルギー固定価格買取制度（F I T）による買取りが2019年11月より順次終了する。買取り期間終了後の売電価格は相当安価になると予想されることから、政府は太陽光発電の有効活用や自家消費を進めるために、蓄電池等需要家小型機器を遠方から一括制御するバーチャルパワープラント（V P P）等の開発を進めている。政府主導のプロジェクトは、要素開発を主とした第1フェーズ（平成22年～26年）で機器や通信などプラットフォームの仕様標準化が実施された。平成28年度よりV P Pサービス事業の実証を主とした第2フェーズが開始されており、多くのサービス実証事業が実施されている。

V P Pサービス事業においては、住宅内機器を制御するための住宅エネルギーマネジメントシステム（H E M S）が整備されている必要がある。H E M Sサーバはインターネット回線を介した外部からの住宅内機器制御信号を受け、各機器に具体的な制御指令を出す。政府が別途強力に進めているゼロエネルギーハウス（Z E H：ゼッチ）普及促進事業において、H E M S設置が補助金支給の条件になっていることから、H E M Sは徐々に普及している。

また、H E M Sの発電・電力消費モニタリング機能を使って収集した住宅電力データを使った省エネ支援・機器異常検知サービスや、見守りサービス、情報配信サービスなどのH E M Sサービスの大規模実証事業（平成26～27年）やサービスの事業化が行われている。H E M Sサービス事業はV P Pサービス事業実施に必要な住宅データの取得という意味合いもあり、V P Pサービス事業進出の準備ともいえる。

このような情勢下において、住宅向けにどのようなサービスが可能か、サービスを実施するにはどのような課題があるかを検討した。

2. V P Pサービス事業のサービス内容

関西電力グループが行っている実証事業では、空調、給湯器（エコキュート）、電気自動車、蓄電池、太陽光発電などの住宅機器（リソース）を外部の事業者（アグリゲータ）が遠隔で一括監視、制御を行い、次のサービスを提供する計画となっている¹⁾。

- ・機器を制御することで電力需要を減少させ、小売り事業者に減少分を供給する（ネガワット取引）。
- ・機器を制御することで電力需要を増加あるいは減少

させ、系統運用者に電力需給バランス調整力を供給する。

- ・機器を制御することで電力需要を増加させ、再生可能エネルギーの発電抑制を回避する。
- ・機器を制御することで、住宅のエネルギーコスト低減や再生可能エネルギーの自家消費の促進を行う。

V P Pサービスが提案された当初から、サービスの目的が電力供給者側の都合に偏っているのではないかと、機器を所有する住宅側の利益は何かという問いが投げかけられてきた。制御対象は住宅が所有する機器であることから、住宅側に利益がないと住宅側のH E M S等インフラ整備が進まないし、住宅の参加もままならない。住宅側の利益を第一に考えるべきである。

空調や照明等まさに今必要であるから運転している住宅機器を制御対象とすると、居住者に不便を強いることになる。一方で蓄電池や蓄湯式給湯器（エコキュート）など蓄エネルギー機器は、居住者が蓄えたエネルギーを電気や湯の形で利用する際に支障がなければ、どの時間帯にどの大きさで蓄エネルギーをしても居住者の便宜に悪影響が及ばない。また、再生可能エネルギーの自家消費や安価な電力を利用して上手に蓄エネルギーができれば、住宅側に経済的な利益があると考えられる。

以上のことから、蓄電池や蓄湯式給湯器など蓄エネルギー機器の蓄エネルギー時間帯の調整が、住宅向けのV P Pサービス内容として最も有力と考えられることから、このサービスについて検討を行った。

3. 蓄エネルギー機器の運転調整の具体的な内容

H E M Sにはリアルタイムのデータ収集機能はないため、H E M Sを使ったリアルタイム制御はできない。蓄電池の充放電制御や蓄湯式給湯器の蓄湯量制御等は機器の制御装置の持つリアルタイム制御機能を利用する必要がある。すなわちH E M Sから機器の制御装置に設定値を渡し、実際の制御は機器側で行わせることになる。H E M Sサーバと機器との制御信号のやりとりは現在標準化が進められており、実際の制御にあたっては電力小売り事業者の制御装置とH E M S間、H E M Sと機器制御装置間の制御の整合や協調を図る必要がある。

3.1 蓄湯式給湯器の運転時間帯調整

蓄湯式給湯器は、買電価格の安価な夜間帯に運転することが原則であるが、F I T買取り終了後の太陽光発電売電価格は、夜間帯の買電価格より安価と予想さ

れる（F I T 買取り終了後の太陽光売電価格は現時点では不明であるが、余剰電力買取りと同等と予想される）ため、太陽光の余剰（自家消費しきれず送電している分）で運転した方が経済的に有利となる。すなわち、本来なら当日の深夜早朝に運転して蓄湯するところを深夜早朝には運転せず、太陽光の余剰のある昼間に運転し蓄湯して夕刻の給湯に備える。ただし、ある程度早朝に運転しておかないと朝方の給湯に支障をきたすため、一部深夜早朝に運転を行い、朝方にある程度の残湯量（例えば 40%）を確保する。蓄湯式給湯器の運転時間帯調整のイメージ図を図-1 に示す。

太陽光の余剰は天候等で変動するため、蓄湯式給湯器を昼間運転すると場合によっては余剰が不足して、高価な昼間帯の電力を受電することになり経済性を損ねる可能性がある。蓄湯式給湯器の昼間運転のためには、太陽光の余剰を正確に予想する必要がある。一方で、太陽光余剰予想精度向上には限度があるため、予想外れの際に昼間受電した電力の料金を優遇しないと本サービスの普及は難しいと考えられる。余剰予想精度の向上対策および予想誤差による受電がどの程度発生するかの定量的な評価を踏まえた料金制度設計が、本サービス実施の要であると考えられる。

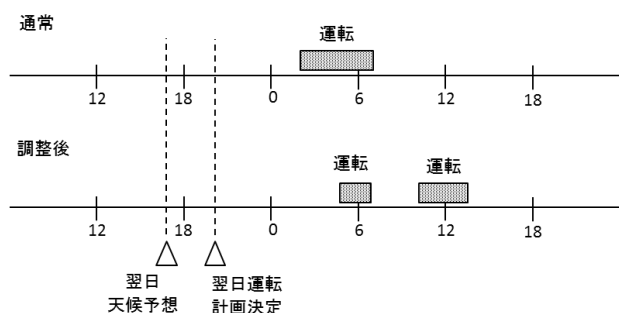


図-1 蓄湯式給湯器運転時間帯調整イメージ図

3.2 蓄電池の充電時間帯調整

住宅用蓄電池の運用は、買電価格の安価な夜間帯に最大限充電し、買電価格の高価な昼間帯・夕方帯に放電して昼間帯・夕方帯の買電量を最小化することが原則である。F I T 買取り終了後の太陽光余剰がある場合は、夜間帯の充電を抑制し、余剰電力を使って昼間帯に充電して太陽光の自家消費分を増加させることができる。具体的には、昼間に太陽光の余剰発生が見込まれる場合は昼間の充電量を予想し、それにあわせて夜間の充電量を最大ゼロまで減らす。蓄電池の充電時間帯調整のイメージ図を図-2 に示す。

蓄電池は充放電電力を連続的に自由に制御できる

ため、昼間帯の充電時に受電を発生させることが無いように制御可能である。ただし、余剰電力が予想より多い場合は充電しきれず余剰送電が多めに発生し、余剰電力が予想より少ない場合は充電量が不足して昼間帯・夕方帯の買電量が増加して、いずれも蓄電池を十分生かし切れず経済性が悪化する。したがって、蓄電池の充電時間帯調整においても、太陽光の余剰を正確に予想する必要がある。

また、蓄電池には大きな充放電損失（約 25~30%）があり、売買電価格差が損失分を考慮しても十分小さくしなければそもそも経済性が成り立たない。運転時間帯調整のイメージは給湯器とほぼ同じであるが、経済性の面ではかなり様相が異なる。

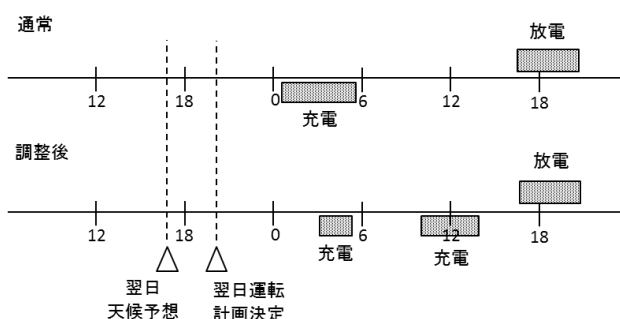


図-2 住宅用蓄電池充電時間帯調整イメージ図

3.3 売買電価格差の影響

蓄電池や蓄湯式給湯器の運転時間帯の調整は、売買電価格の安価な時間帯に蓄エネルギーを行うことにより経済性を確保するので、調整は時間帯別の売買電価格に大きな影響を受ける。そこで、価格差の調整への影響を評価した。

(1) 蓄湯式給湯器

蓄湯式給湯器は、エコキュートの場合はヒートポンプの特性上外気温の高い昼間に効率が高くなるが、日間ではどの時間帯で運転してもほぼ消費電力量は同じと考えられるので、最も電気料金の安価な時間帯での運転が最も経済性が高くなる。現状の時間帯別料金制度では、夜間帯が最も安価で、昼間帯、夕方帯はかなり高価となっている。太陽光の余剰も利用可能であり、F I T 買取り期間中の買取り価格は昼間帯買電価格と同等以上となっているため使えないが、F I T 買取り終了後は現状の余剰電力買取り価格程度と予想されるため、給湯器運転に利用できる。

蓄湯式給湯器の場合は、利用できる電力として夜間帯電力およびF I T 買取り終了後の太陽光余剰が考えられ、安価な方を選択することになる（図-3）。

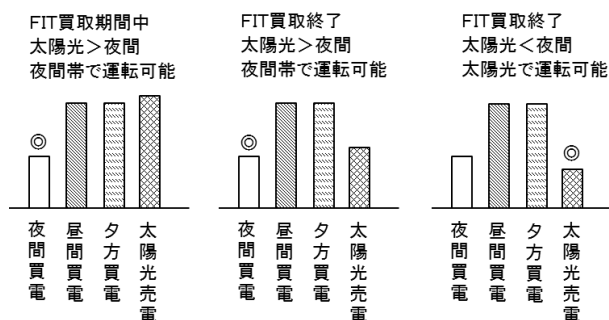


図-3 蓄湯式給湯器運転電力選択

したがって、FIT買取り終了後の太陽光発電売電価格が夜間帯買電価格より高価であれば、蓄湯式給湯器の運転は現状と同じ夜間帯の電力を使えば良く、V P P サービスは必要ないことになる。また、FIT買取り終了後の太陽光発電売電価格が夜間帯買電価格より安価であってもその値差がわずかであれば、昼間運転時に高価な昼間帯電力を受電する可能性を考慮すると、太陽光余剰が比較的少ない日は昼間運転しない方が良い。

(2) 住宅用蓄電池

住宅用蓄電池の充電電力として利用できるのは、給湯器と同じく夜間帯電力およびFIT買取り終了後の太陽光余剰と考えられるが、蓄電池の場合大きな充放電損失（約30%）があるため、損失を考慮した放電電力価格（損失30%の場合、充電電力価格の1.43倍）が放電する時間帯の買電価格より安価でないと蓄電する経済的な意味が無くなる。すなわち充放電損失があるために、より大きな電力価格差がないと経済性を確保できない（図-4）。蓄湯式給湯器は運転できない場面はなかったが、蓄電池は充電できない可能性がある。

V P P サービスという観点から見ると、蓄電池のサービスは蓄湯式給湯器のサービスより実現可能性が低いことになる。

4. 太陽光余剰予想

太陽光の余剰（太陽光発電電力-住宅消費電力）を予想するためには、太陽光発電電力と住宅消費電力を予想できなければならない。そのため、下記を実施する必要がある。

- ・個別太陽光発電実績の分析
- ・個別住宅消費電力の分析
蓄湯式給湯器、空調機、その他需要に分割して分析
- ・個別太陽光発電の発電実績分析結果および天候予想による個別太陽光発電予想

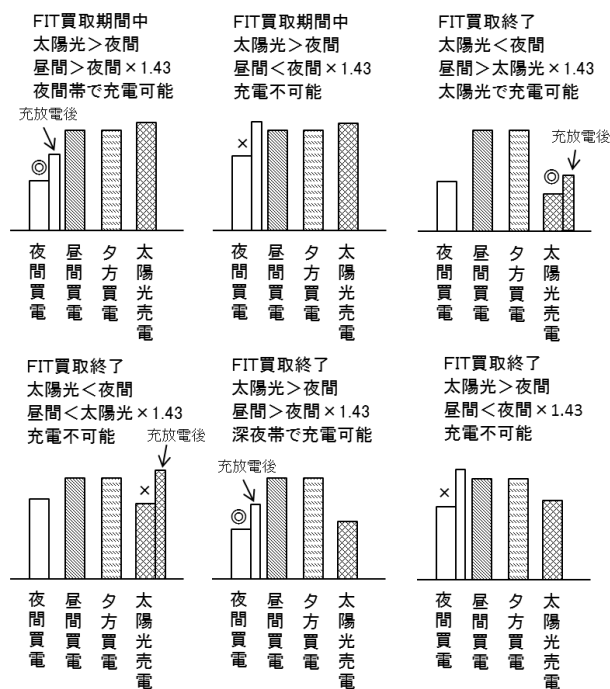


図-4 蓄電池充電電力選択

- ・個別住宅消費電力の実績分析結果およびその住宅の傾向や天候予想による個別住宅消費電力予想

上記分析を行うためには、住宅の詳細な電力測定データが必要である。住宅の詳細な電力測定は、現状ではHEMSを利用するのが最も容易である。HEMSは外部からの機器制御信号を住宅内機器に仲介するゲートウェイの役割とともに、住宅内電力測定に重要な役割を果たす。V P P サービスを実施するためには、V P P サービスを開始する前からHEMSサービスを開始して、サービスを行う住宅の住宅内電力データを蓄積しておく必要があり、HEMSサービスはV P P サービスを行うための前準備という意味合いも大きい。

上記分析および予想には人工知能（A I）を適用すべきと考えられるが、ひとまず表計算ソフトを使用して下記方法で分析・予想を行った。

4.1 個別太陽光発電実績分析

太陽光発電量は太陽の高度、気温、設置条件、日射量に影響を受ける。これらはほぼ、月別、住宅別、天候別の場合分けに対応している。そこで、各住宅の各月の各時間の最大発電量を求め、これをその住宅のその月の最大発電パターンとし、これに日射量の強度相対値（最大値を1）を乗ずることで太陽光発電量を予想するという考え方で発電実績を分析した。

天候実績データとして容易に得られるのは、測候所の天気実績である。また、天候予想データとして容易

に得られるのは天気予報データである。そこで、天候データは天気予報文面（例えば晴れ時々曇り）で代表し天候パターンとして分類した（晴れを細かく分類し雨は大まかに分類：13 分類）。

住宅毎に毎日の各時の太陽光発電量の最大発電量に対する比（上記日射量の強度相対値）を求め、天候パターン毎に平均した値（太陽光発電天候係数）を求めた。

4.2 個別住宅消費電力分析

住宅の消費電力は、調整対象の蓄湯式給湯器消費電力、外気温の影響が大きく季節間で大きく変動する空調機消費電力、各住宅の生活様式に影響を受けるその他消費電力（照明、調理、個別機器など）に分割し、月、曜日、気温の影響を加味して予想するという考え方で住宅消費電力を分析した。

蓄湯式給湯器消費電力は、外気温、給水水温等で変化するため、住宅別、月毎に分析を行った。生活パターンは曜日で分類できると予想されるため、曜日で分けて分析した。

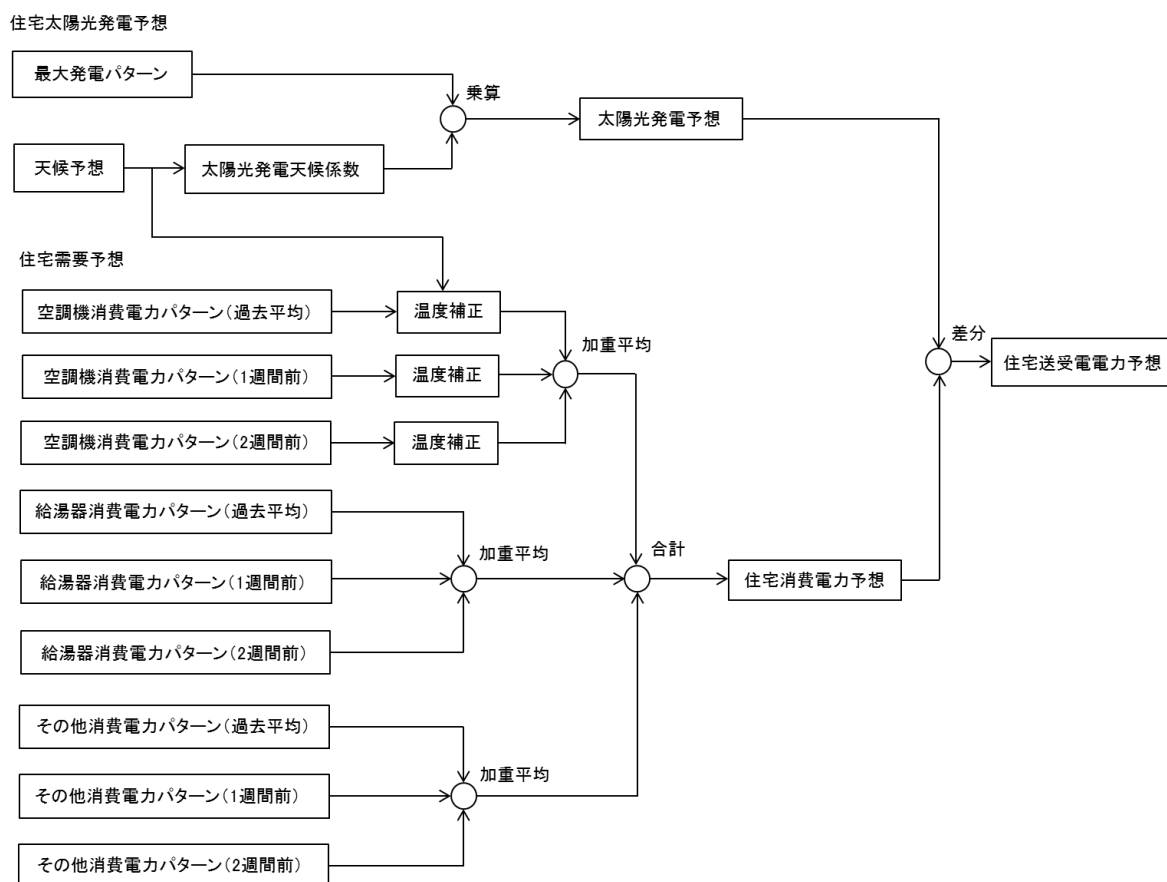
空調機消費電力は外気温の影響を大きく受ける。毎日の空調機消費電力量相対値（その日の空調機消費電力量/その月の空調機消費電力量平均値）と外気温（最高気温、最低気温など）との相関を調べ、消費電力の温度変化率および空調機が使われなくなる外温度を求めた。また、各住宅の消費特性は、月別、曜日別で分析した。同様に各住宅のその他消費電力も月別、曜日別で分析した。

4.3 個別太陽光発電予想

各住宅の太陽光発電量予想は、それぞれの住宅のその月の最大発電パターンに、天候予想の天候パターンに対応する太陽光発電天候係数を乗じて求めた。

4.4 個別住宅消費電力予想

各住宅の消費電力予想は、蓄湯式給湯器消費電力、空調機消費電力、その他消費電力を個別に予想し、加算して求めた。それぞれの消費電力は月別、曜日別の過去実績に基づいて予想した。空調機消費電力に関しては、外気温予想による補正を加えた。



図－5 住宅送受電力予想方法の概要

消費電力の予想にあたっては、過去データの分析結果（過去の平均値）と最近の実績を使用した。至近のデータが最近の生活パターンを反映していると考えられるが、その時だけの非定常的な生活パターンの影響を大きく受けるため、平均的な生活パターンを反映していると考えられる過去の平均値との併用とした。

太陽光発電の予想と消費電力の予想から、住宅の送受電電力を予想した。住宅送受電電力予想方法の概要を図-5に示す。

5. 蓄電池および蓄湯式給湯器の運転時間帯調整

予想された太陽光余剰にまず、消費電力調整機能の無い蓄湯式給湯器の運転を割り当てる。予想誤差を考慮して給湯器消費電力よりやや大きな余剰が連続してある時間帯に給湯器の運転を割り当てる。

次に、給湯器を調整した後の住宅送受電電力予想を作成し、蓄電池を割り付ける。まず、昼間送電部分を蓄電池容量内で最大限蓄電し、蓄電容量に余裕があれば夜間帯で最大限充電する。また、昼間帯、夕方帯の受電を最小にするよう放電する（図-6）。

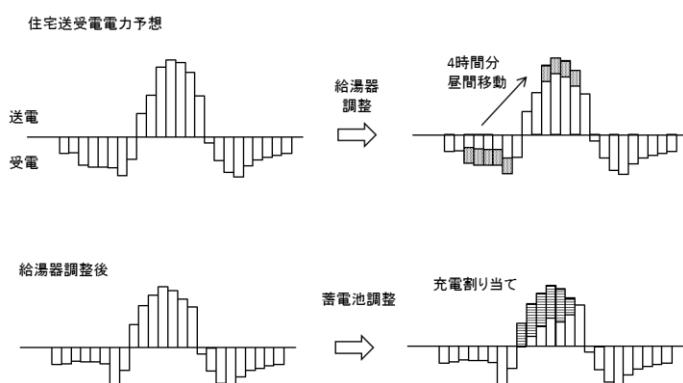


図-6 給湯器、蓄電池運転時間帯調整イメージ図

6. VPPサービスの実施形態

ここまでの検討は、住宅の蓄電池および蓄湯式給湯器の運転時間帯を調整し、買電価格の高価な時間帯の受電を極力少なくし、住宅側の経済的な利益を最大にする運用を目指したものである。一方で、電力系統側の運用費用削減もVPPの大きな目的の一つである。例えば、余剰電力がある時間帯に住宅の蓄電池を充電し蓄湯式給湯器を運転する、需要が逼迫している時間帯には住宅の蓄電池を放電し蓄湯式給湯器が運転している場合は停止し別の時間帯に運転する、などの電力需給調整が考えられる。

従来は夜間帯に余剰電力が発生し、昼間に電力需要が逼迫していたため、夜間帯の電力料金を安価に、昼間の電気料金を高価にすることでこれら機器の運転時間帯を誘導できた。ところが、再生可能エネルギー発電が大幅に増加すると電力需給が複雑になり、余剰がある時間帯や需給が逼迫する時間帯が日替わりで変るようになる。日々電気料金を変更するのが究極の姿であろうが、住宅がこれに対応できるのは相当先のことになるので、その第一歩としてVPPサービスがあるといえる。

問題は現状の電気料金体系下で住宅側の経済性を追求した運用と電力系統側の運用費用削減を追求した運用が一致しない可能性が高いことである。従来のVPPサービスの考え方は、再生可能エネルギー発電の増加により需給調整能力が低下していることから、電力系統側の都合を優先させるものであった。この場合の住宅側の経済的な損失に対する補償がこれまで明確でなかったが、住宅側の経済性を追求した場合の運用が明確にできれば、その差から金銭的な損失補償は可能と考えられる。VPPサービス普及のためにも、系統側の都合で調整した際の住宅への補償を明確にすべきである。

VPPサービスの実施形態イメージを図-7に示す。住宅内消費電力や太陽光発電量のデータが必要なため、HEMSサービスも実施する内容となっている。得られるデータは現状HEMSの標準である30分周期の平均電力値（30分間積算電力量値）である。また、個々の住宅との制御指令や電力データのやりとりはアグリゲータの活用を想定している。

VPPサービスにおいて電力小売り事業者とアグリゲータの分担範囲を考える。住宅側の経済運用および電力系統側の都合で住宅の蓄電池および蓄湯式給湯器の運転時間帯を調整する制御指令を出すところは、そのルールが明確であれば電力小売り事業者とアグリゲータいずれが行っても基本的に結果は同じである。

一方、電力小売り事業者は、電力の供給と需要を一致させる必要があるため、住宅の蓄電池および蓄湯式給湯器の実際の運転時間帯調整制御指令を知る必要がある。調整制御指令に対する運転結果を分析し、その制御誤差を把握して制御方法の改善を行う必要がある。このためには、スマートメータAルートでは住宅全体の送受電量しか把握できないため、VPPサービス側で得られる住宅内電力データの保有が必要になる。実績データの保有や分析をアグリゲータに任せると、ア

グリゲータからの報告を電力小売り事業者側では検証できず、アグリゲータの評価が行えなくなる。アグリゲータに実績データ蓄積・分析評価の部分任せると結局電力小売り事業者もアグリゲータ評価のために同じことを行う必要があり、それならば最初から制御指令や実績分析の部分は電力小売り事業者で行った方が業務の重複がなく、費用も少なくできる。この場合、アグリゲータは電気小売り事業者からの指令を各住宅に取り次ぎ、また各住宅からのデータを電力小売り事業者に取り次ぐだけの業務となる。

もちろん将来的には、実績を十分積んだ信頼できる大手アグリゲータに丸投げするという選択肢も考えられるが、少なくともサービス事業化の初期の段階では、実績の十分ある信頼できるアグリゲータが存在しないため、電力小売り事業者で行うべきと考える。

7. VPPサービスの課題

7.1 蓄湯式給湯器の課題

蓄湯式給湯器に対してV P Pサービスを実施するにあたり、下記課題がある。

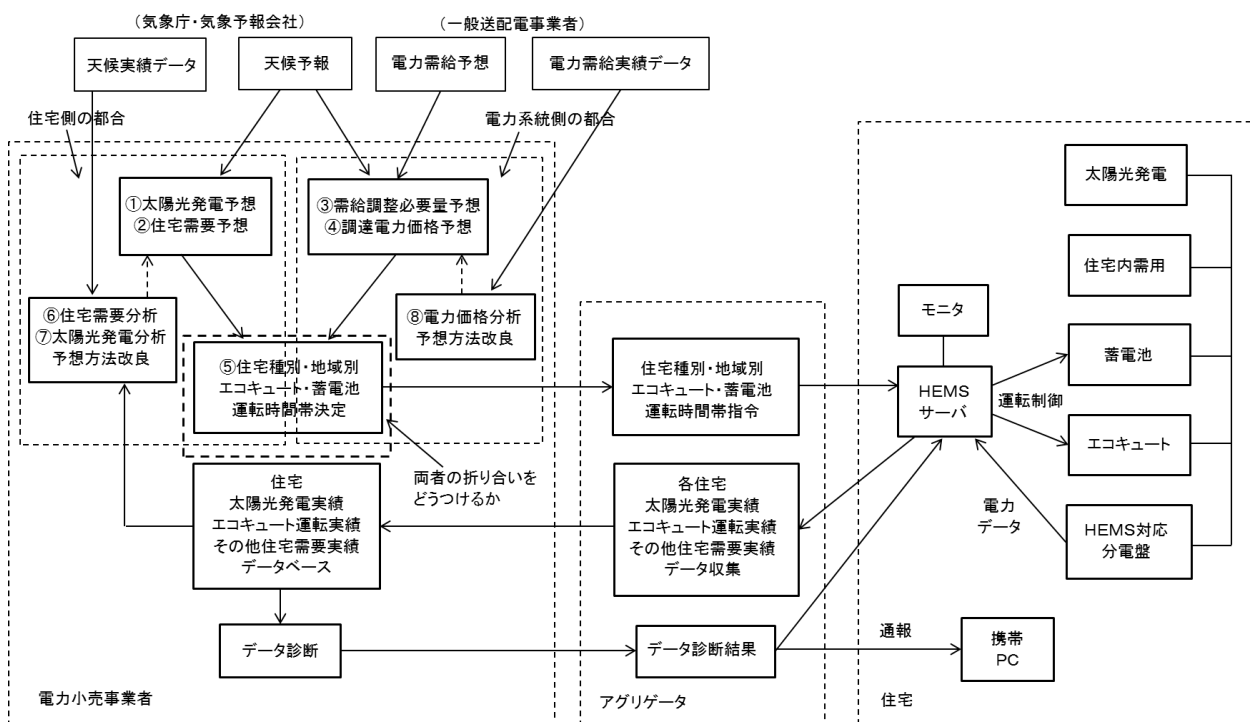
- ・住宅へのHEMS普及率が極めて低い。
現状では、住宅へのHEMS設置により経済的な利益が得られないため、普及率は極めて低い。

- ・蓄湯式給湯器のHEMS対応率が極めて低い。
蓄湯式給湯器は広く普及しているものの、最新型のエコキュート以外はHEMSの通信規格であるECHONET-Liteに対応していない。エコキュートは深夜電力対応（タイムスイッチ対応）もしていない機種がほとんどであり、ECHONET-Liteにも深夜電力にも対応していないエコキュートはV P Pサービスが行えない。すなわち既存のエコキュートはほとんどの機器でV P Pサービスが行えない。
電気温水器に関しては、ECHONET-Liteに対応している機種はほとんど無く、基本的に深夜電力対応となっている。こちらもそのままではV P Pサービスが行えない。

7.2 住宅用蓄電池の課題

住宅用蓄電池に対してV P Pサービスを実施するにあたり、下記課題がある。

- ・住宅へのHEMS普及率が極めて低い。
- ・住宅への蓄電池の普及率が極めて低い。
住宅用蓄電池は現状ではほとんど普及していない。給湯器は給湯という直接の便宜を提供する機器であるが、蓄電池は直接の便宜を提供せず、買電価格が安価な時間帯に充電し買電価格が高価な時間帯に放電して、経済的な利益を得る機器である。現状



図ー7 V P Pサービス実施形態イメージ

の時間帯による買電価格の差と蓄電池価格では経済的な利益が得られないため、当然普及しない。また、同様に最新型の蓄電池以外は ECHONET-Lite に対応していない。

7.3 VPPサービス普及に向けた対応

(1) 住宅へのHEMS設置促進

住宅にHEMSを普及させるには、HEMSを使った、経済的に利益のあるサービスを先に提案するしかない。また、HEMS設置コストを低価格化（究極は住宅側負担なし）を進める必要がある。HEMS設置コストの低価格化として、機能を限定した装置を開発すること、特にすでに機器が普及している蓄湯式給湯器を制御する専用の装置の開発が考えられる。

(2) ECHONET-Lite 非対応給湯器への対応

ECHONET-Lite に対応していない蓄湯式給湯器をHEMSで制御するには、現状の深夜電力タイムスイッチを ECHONET-Lite 対応のスイッチに変更して通電時間を自由に調整できるタイプ（図-8）がまず考えられる。給湯器の消費電力は専用のスマートメータで計測できるため、HEMSによる電力計測は必要ない。

ただし、給湯器がタイムスイッチによる開閉に対応している必要がある。機器仕様上は深夜電力対応と表記されており、給湯器制御電源を主回路ではなくコンセントから別途供給できるタイプである。これまで調査したところでは、電気温水器は深夜電力に対応しているが、エコキュートは通常、時間帯別料金のみに対

応し深夜電力には対応していない。したがって、この方式で対応できるのは実質電気温水器のみと考えられる。住宅にHEMSを整備しないことから、給湯器制御に特化した専用HEMSサーバも開発する必要がある。蓄湯式給湯器を ECHONET-Lite 対応品に更新した際にはスイッチを撤去し、専用HEMSサーバはそのまま使える仕様とすればよい。

太陽光発電を有していない住宅では、発電電力の自家消費が無いため本方式を適用して一切問題ない。買電価格以外に住宅側の都合で給湯器運転時間帯の調整を行う必要性がないため、給湯器電気料金を24時間一定低料金とすれば、電力小売り事業者の都合だけで給湯器運転時間を調整することも可能である。

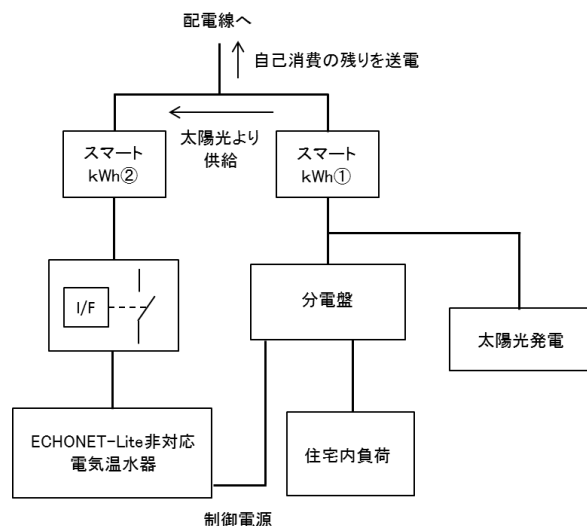


図-9 小型太陽光発電がある場合のイメージ図

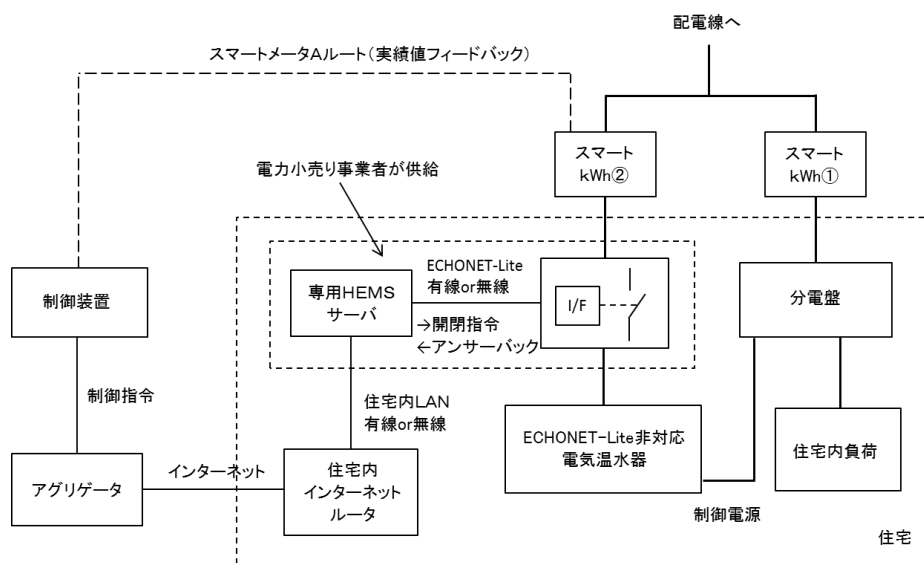


図-8 太陽光がない場合のHEMS対応スイッチを使った制御のイメージ図

太陽光発電と蓄湯式給湯器を有する住宅では、太陽光発電を給湯器で自家消費した場合の経済性が高いと考えられる。ただし、太陽光発電の容量が小さく、太陽光発電を蓄湯式給湯器で自家消費すると発電量の不足により昼間受電が頻繁に発生し自家消費による利益がほとんどない場合には、本方式の適用が可能と考えられる（図-9）。

ただし、住宅送受電量は下記のとおり算出する必要がある。

太陽光接続側のスマートメータ①が送電の場合は、住宅の送電量は、

$$\text{送電量} = \text{スマートメータ①} - \text{スマートメータ②}$$

給湯器が系統から受電する電力量は、

スマートメータ①受電の場合は、

$$\text{受電量} = \text{スマートメータ②}$$

スマートメータ①送電の場合は、

$$\text{受電量} = \text{スマートメータ②} - \text{スマートメータ①}$$

ただし、受電量が負の場合は0（系統へ送電）

複数電力量計測定値の加減算により取引電力量を算定することはこれまで例がないが、政府はV P P 事業化のために、複数電力量計測定値の加減算による取引電力量算定を認める方針である²⁾。

容量の大きな太陽光発電と蓄湯式給湯器を有する住宅では余剰が多く発生するため、太陽光余剰の給湯器による自家消費を優先すべきである。その場合は給湯器を住宅分電盤に接続して住宅内で余剰を自家消費する時間帯別料金対応の回路構成が望ましい。蓄湯式給湯器の制御は同様に、ECHONET-Lite 対応のスイッチを利用する（図-10）。給湯器は深夜電力対応である必要がある。また、余剰量の予想のために、4章に示したとおり住宅内の電力量計測が必要であり、現状では住宅内電力量計測にはHEMSを利用するのが最も簡単のため、HEMS対応分電盤への取替および汎用HEMSサーバの設置が必要である。蓄湯式給湯器をECHONET-Lite 対応品に更新した際にはスイッチを撤去し、給湯器をHEMSサーバに接続すれば良い。

本方式では、住宅側の経済性を追求して給湯器の運転時間帯を調整することが多くなり、電力小売り事業者の都合だけで調整することは難しくなるため、電気料金は通常の時間帯別料金で良い。電力小売り事業者の都合で調整した場合は、住宅側の経済性で調整した場合からの電気料金増分を補償すれば良い。

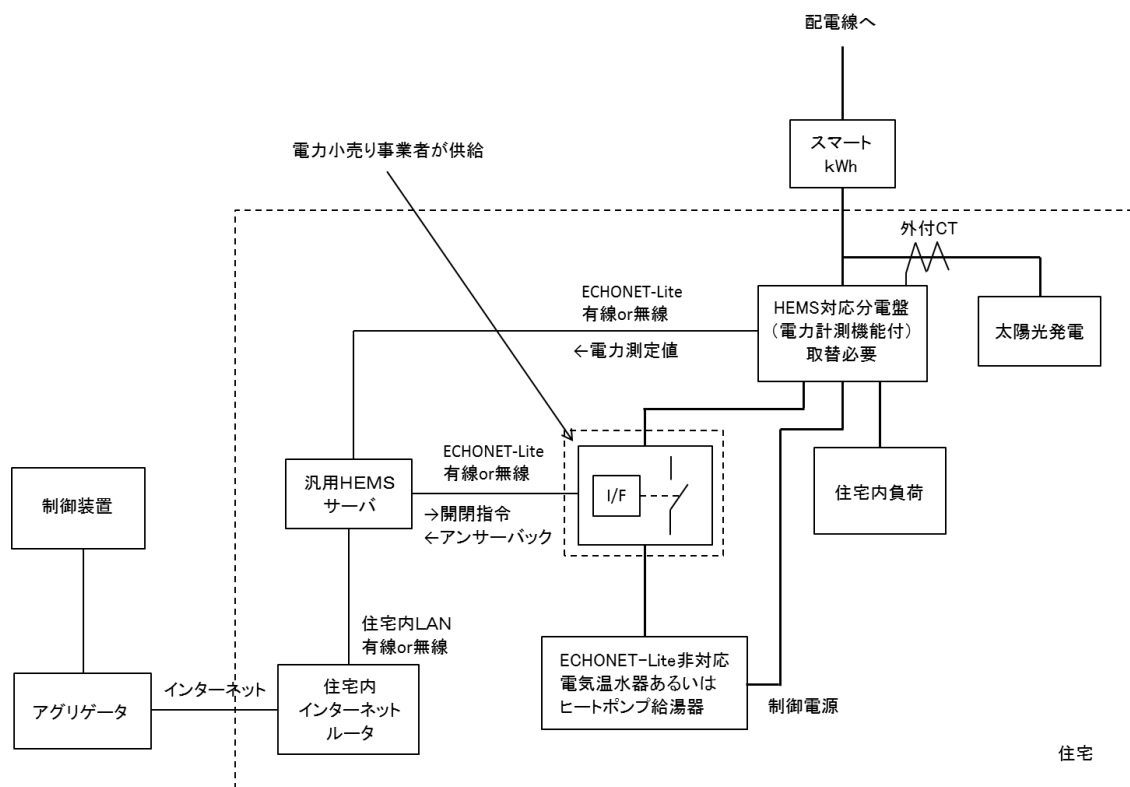


図-10 太陽光がある場合のHEMS対応スイッチを使った制御のイメージ図

(3) 住宅用蓄電池への対応

住宅用蓄電池は現状ではほとんど普及しておらず、現在販売されている蓄電池は標準で ECHONET-Lite に対応しているため、住宅用蓄電池は ECHONET-Lite に対応していることで考えれば良い。したがって、住宅内の回路構成は標準的な HEMS 対応の構成となる (図-11)。

蓄電池は充放電電力を連続的に高速で制御でき、住宅送受電電力を自由に制御できるなど、容量制限以外は運用制約がほぼないため、太陽光余剰の自家消費には最も望ましい。一方で蓄電池価格が高価で蓄電池費用をなかなか回収できないこと、電池が高価なため市販されている蓄電池の容量 (特に kWh 容量) が小さいことが課題である。

蓄電池寿命を 20 年、充放電効率を 70%、金利は 0%、保守費用なし、毎日 1 回最大限充放電するとして、充放電電力価格差により寿命期間で設備費用を回収できる蓄電池価格を図-12 に示す。20 年経過で容量は 30% 減少すると予想されるため、平均容量は 85% としている。現状の充電電力価格約 13 円/kWh、充放電電力価格差約 15 円/kWh では、電池価格 (システム価格) は 5 万円/kWh 以下でないと蓄電池費用を回収できない。金利や修繕を考えると 4 万円/kWh 以下が必要である。現状住宅用蓄電池は非常に高価 (20 万円/kWh 以上) である。国内蓄電池メーカーにヒアリングしたと

ころでは、現状の小型リチウムイオン電池では 10 万円/kWh 程度が限界とのことであった。この電池価格は、太陽光の余剰が 5 円/kWh、充放電電力価格差 20 円/kWh 程度であれば回収できる水準であり、あり得ない数字ではない。

現状市販されている住宅向けリチウムイオン電池の容量は kW 容量が 3kW 程度、kWh 容量 (定格でなく実質容量) が 6~12kWh 程度である。一方、晴天時の単位発電容量 (kW) あたりの太陽光発電量 (kWh) 実績値は春夏季で 6kWh/日、冬季で 3kWh/日程度となっている³⁾。現在の標準的な住宅の太陽光発電容量 5kW では 15~30kWh/日となり、蓄電池容量は相当不足する。

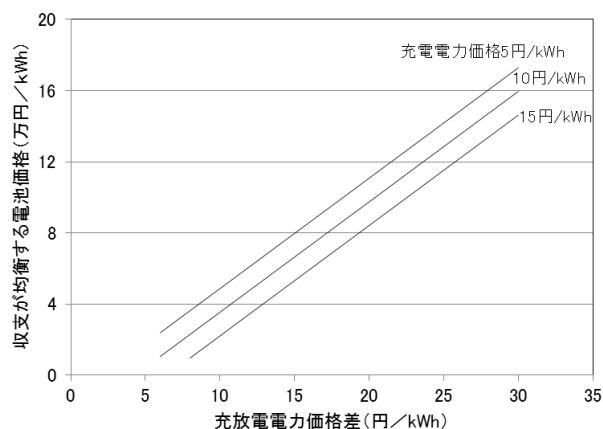


図-12 蓄電池の限界価格

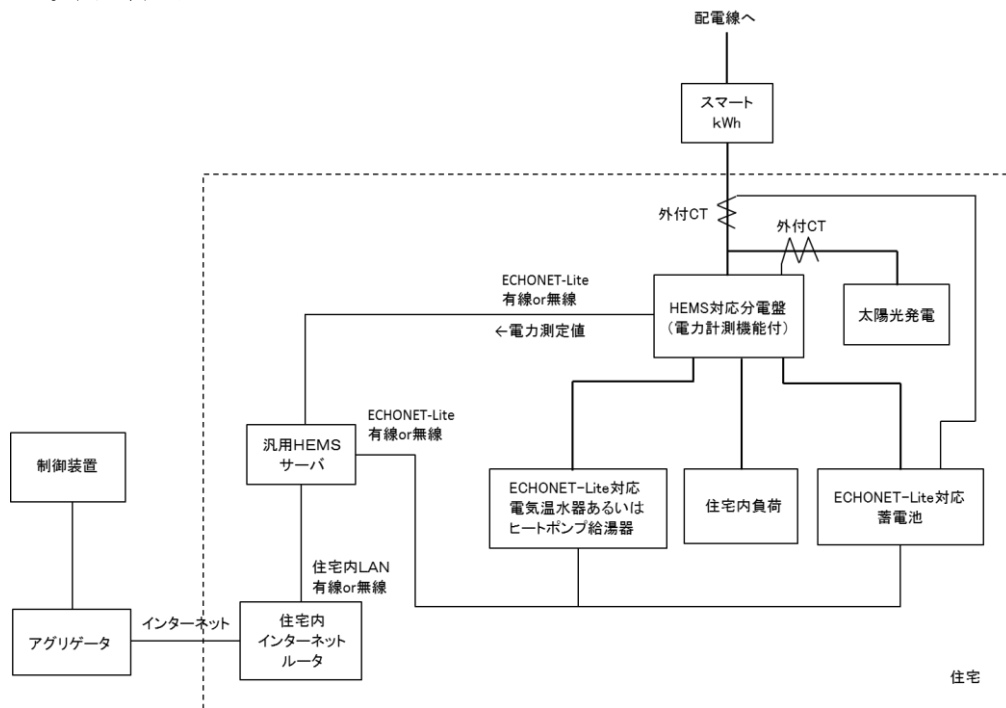


図-11 太陽光、蓄電池がある場合の装置構成イメージ図

また、政府の 2030 年時点での再生可能エネルギー導入計画では、太陽光・風力とも現状の約 3 倍となっており⁴⁾、電力需給バランスを取るために相当量の蓄エネルギー機器導入が必要と予想される。蓄湯式給湯器の運転調整だけではとても間に合わず、蓄電池の大量導入が必要である。これには住宅だけでなく、再生可能エネルギー発電所併設蓄電池、系統調整用大型蓄電池、業務用大型蓄電池の大量導入が必要である。蓄電池は現状では小型リチウムイオン電池が主流であるが、今後は大型蓄電池が増えると予想される。また、大型蓄電池は既に 4~6 万円/kWh 程度まで価格低減されており、今後の大量普及によりさらに価格低下が進むと予想され、住宅向けサービスにも大型蓄電池を利用する方が経済性を確保しやすいと考えられる。

(4) 大型蓄電池を使った住宅向けサービス

各住宅に設置した小型蓄電池を集合させ、大型蓄電池で全く同等のサービスを実施できる。大型蓄電池を多数の小口需要家で共有するサービス（大型蓄電池のシェアリングサービス）ともいえる。大型蓄電池のシェアリングサービスは、集合住宅も含めた自宅に蓄電池を設置できない住宅にも蓄電池サービスを提供できる。また、大型蓄電池は kWh 容量を大きくし易いため、太陽光余剰の自家利用には特に有利となる。ただし、蓄電池は住宅から離れた場所に設置されるため、住宅と大型蓄電池の間に配電線を介した電力のやりとりが発生する。配電線を介した蓄電池の充放電は、託送料金も含めてまだ取り扱いが明確になっていない。

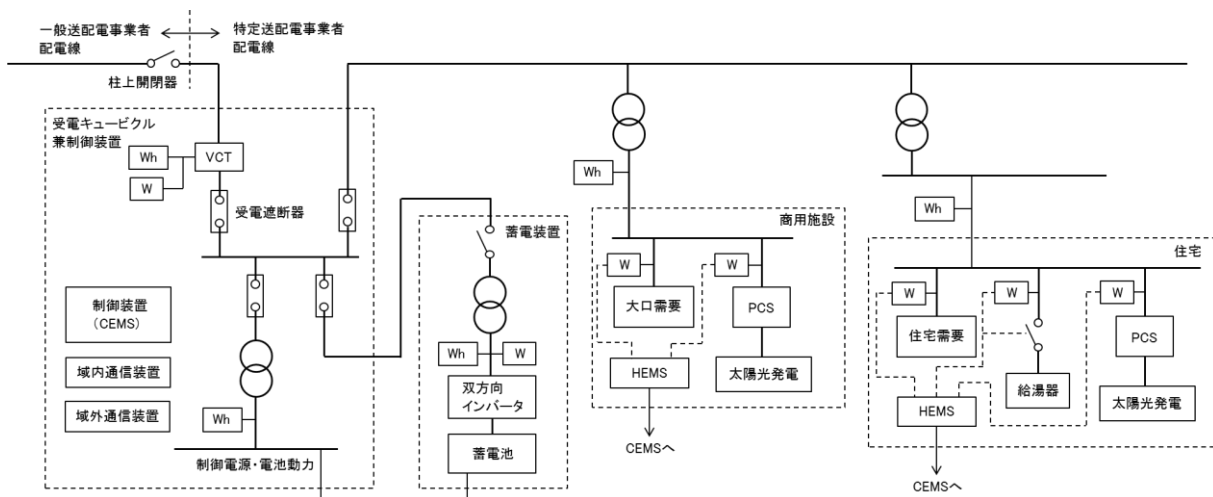


図-1.3 団地一括受電蓄電サービス設備構成イメージ図

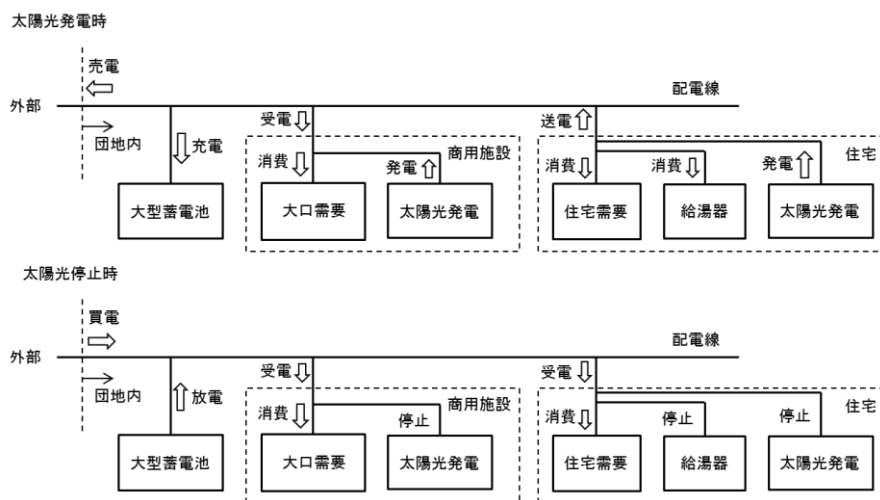


図-1.4 団地一括受電蓄電サービス電力フローイメージ図

(a) 団地一括受電のケース

団地に大型蓄電池を設置し、団地の住宅に蓄電サービス提供が可能である。装置構成のイメージを図-13に、電力フローのイメージを図-14に示す。団地一括受電（団地内は特定送配電事業として配電サービスも提供）とすると、住宅-大型蓄電池間の託送の課題がない。また、一括受電点電力で団地内の電力バランスが把握でき、住宅でのリアルタイム計測は必要なく、受電点だけのリアルタイム計測で蓄電池をリアルタイム制御できる。

先のV P Pサービスと同様に、各住宅の発電・需要実績はHEMSを使ってデータ収集し、これらを使って発電・住宅需要予想を行う。発電・住宅需要予想からまず蓄湯式給湯器の運転調整を行い、その後、団地全体の送受電量を求める。太陽光余剰の自家消費促進、電力料金の高価な時間帯の受電抑制・余剰電力の高価販売、電力料金の安価な時間帯での蓄電池充電など経済的に最適な蓄電池運用を、地域エネルギー管理システム（CEMS）を使って行う。また、CEMSからの指令により、HEMSを介して住宅の蓄湯式給湯器の運転時間帯調整を行う。

この方式では、団地内での電力融通が可能であり、個別住宅で制御するより団地一括で制御の方が電力系統への送電は減少する。また、受電点1点での制御のため、各戸毎に制御するより制御は容易となる。現状でも実現可能と思われる。

(b) 同じ配電線に接続された個別住宅のケース

団地一括受電のケースを拡張して、同じ配電線に接続されている点在する住宅と大型蓄電池で構成されるグループで同じサービスが可能である。設備構成イメージを図-15に示す。個別住宅および大型蓄電池の連系点の送受電電力をリアルタイムに計測し、すべてを加算すれば、団地一括受電のケースの受電点での計測と全く同じである。配電線の途中で蓄電池充放電電力のやりとりが発生するが、配電用変電所端での配電線電力は、団地一括受電のケースと全く同じになる。

今のところ、このような蓄電池充放電の託送の取り扱いが明確でなく現状では実現できないが、大型蓄電池の導入費用を住宅向けサービスで回収できるビジネスモデルであり、将来的に大型蓄電池を大量導入する際には活用すべきと考えられる。

8. まとめ

- ・住宅側の便宜に悪影響を及ぼさないこと、住宅太陽光発電のF I T買取り終了後の売電価格は不明であるが余剰電力と同程度のかかなり安価になり太陽光発電の自家消費が経済的に有利になると予想されることから、蓄電池や蓄湯式給湯器など蓄エネルギー機器の蓄エネルギー時間帯の夜間一昼間調整が住宅向けのV P Pサービス内容として最も有力と考えられる。
- ・V P Pサービスは住宅内の制御や電力測定にHEMSを使用する。そこで、まずHEMSサービスを開始して住宅にHEMSを整備してもらい、これを使って住宅電力データを収集し、次にV P Pサービスを行うことが望ましい。

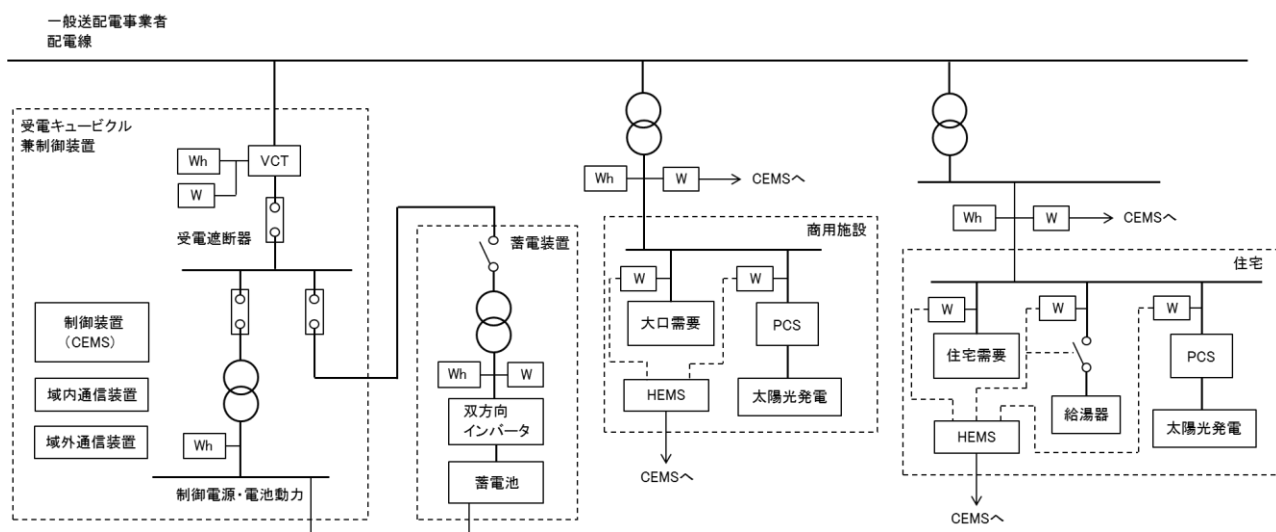


図-15 同一配電線接続住宅向け蓄電サービス設備構成イメージ図

・HEMSはリアルタイム計測やリアルタイム制御に対応していないため、V P Pサービスは運転時間帯など事前に蓄エネルギー機器の設定を変更するだけで、蓄電池の充放電電力制御など実際のリアルタイム制御は機器の制御装置で行う必要がある。したがって、過去実績や天候予想を使って各住宅の翌日の太陽光発電や住宅電力需要を予想し、前日夕刻には翌日の蓄電池や蓄湯式給湯器の運転時間帯（夜間帯、昼間帯）を各住宅の機器制御装置に送信する必要がある。

・電気温水器は通常、深夜電力に対応しECHONET-Liteに対応していないことから、深夜電力と同様なスイッチによる制御を適用する必要がある。太陽光発電を設置していない住宅では太陽光の自家消費がないため、深夜電力のタイムスイッチをHEMS対応スイッチに取替え、温水器制御専用のHEMSサーバを設置することで、住宅にHEMSを整備しなくてもV P Pサービスが実施可能である。24時間同一料金等料金制度さえ適切に設計すれば、電気小売り事業者の都合のみで運転時間帯調整が可能である。一方、広く普及している旧型のエコキュートはECHONET-Liteにも深夜電力にも対応しておらず、現状ではV P Pサービスに対応できない。エコキュートはECHONET-Lite対応の新型をサービス対象とするしかない。

・太陽光発電を設置している住宅では、太陽光の自家消費を優先するため、太陽光発電や住宅電力消費の測定が必要であり、住宅にHEMSを設置して、電力測定と機器制御を行う必要がある。

・住宅用蓄電池は普及していないため、ECHONET-Lite対応の新型をサービス対象とすることでよい。住宅用蓄電池は経済性に難があり普及は難しいと予想される。一方、大型蓄電池シェアリングサービスは経済性に優れること、蓄電池を設置できない住宅にもサービスを提供できることから、今後の住宅向け蓄電池サービスとして有望と考えられる。

9. むすび

本稿は、平成28年度上期に実施したV P Pサービスに関する社内技術調査結果を取りまとめたものである。技術調査にご協力いただいた社外の方々に深く御礼を申し上げる。また、現在開発が進められている技術につき、記載内容の変更や筆者の理解不足による誤りもあるかと思われるがご容赦願いたい。

平成31年11月に迫る小型太陽光発電F I T買取り終了に向け、新たなサービス立ち上げを目指して本稿

に記載した考え方にに基づき、住宅メーカーと共同で蓄電池や蓄湯式給湯器の運転時間帯調整の効果の定量的な評価を実施している。また、機器メーカーに依頼してV P Pサービスを実施するためのハード、ソフト両面の検討を進めている。ここにきてこれまで曖昧であったスマートグリッドが、ほんの一部ではあるが具体的な事業として検討の俎上に乗るようになったことは関係者として非常に感慨深い。

蓄湯式給湯器の運転時間帯調整は、住宅に普及している機器の運転調整であり、実現が比較的容易で投資も少なく事業リスクは小さいと思われ、まず取り組むべきである。大型蓄電池のシェアリングは、電池価格や託送の課題が残るものの、住宅向けに限らず事業者向けとしても蓄電サービスとしてはおそらく経済性や実現性、汎用性で最も優れていると思われ、是非事業として実現したいと考える。

[参考文献]

- 1) 関西電力HP「バーチャルパワープラント構築実証事業への参画について」2016年7月28日
- 2) 経済産業省第2回エネルギーリソースアグリゲーションビジネス検討会 資料4「逆潮流について」2016年3月30日
- 3) NTT スマイルエナジー エコめがねエネルギーブログ「太陽光発電設備1kWあたりの発電量公開」2016年5月20日
- 4) 経済産業省「長期エネルギー需給見通し」2015年7月

脱硝触媒の耐摩耗性評価方法の検討

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 山本 松平
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 山地 豪
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 横田 晃
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 難波 正徳

キーワード： 脱硝触媒
排煙脱硝装置
摩耗
サンドブラスト
フライアッシュ

Key Words : De-NOx catalyst
Selective Catalytic Reduction
Abrasion
Sandblasting
Fly Ash

Study on evaluation method of resistance to abrasion for De-NOx catalyst

Shikoku Research Institute, Inc., Department of Chemical and Biological Technologies
Shohei Yamamoto, Tsuyoshi Yamaji, Akira Yokota and Seitoku Namba

Abstract

In coal-fired power plants, the selective catalytic reduction (SCR) has been used to reduce NOx in exhaust gas. De-NOx catalysts in SCR are abraded by fly ash (FA) in exhaust gas. For the reason, when exchanging De-NOx catalysts from old to new, it is desirable to select new catalysts in consideration of not only catalysts performance but also abrasion resistance to FA. However, there is no official method to evaluate resistance to abrasion for De-NOx catalysts.

In this study, in order to evaluate the abrasion resistance to FA of De-NOx catalysts, we have developed equipment applying sandblast. Using that equipment, it was found that the abrasion resistance of De-NOx catalysts to FA could be compared in a relatively high accuracy and short time. And, it was able to compare the abrasion resistance to FA of De-NOx catalysts with different types or compression strengths by using that equipment.

1. はじめに

石炭火力発電所では排ガス中の窒素酸化物(NOx)を除去するため、排煙脱硝装置(SCR)を設置している¹⁾。装置内に装填された脱硝触媒は、長期間の使用に伴って性能低下するとともに、排ガスに含まれるフライアッシュ(FA)の衝突により摩耗・損傷するため、定期的な交換が必要となる²⁾。そのため、脱硝触媒の交換時には、触媒性能のみならず耐摩耗性も考慮した触媒選定を行う必要があるが、脱硝触媒の耐摩耗性を評価する公定法がない。そこで、自社で比較的容易に脱硝触媒の耐摩耗性を評価できる試験方法を検討した。

2. 耐摩耗性評価試験方法の検討

摩耗現象には様々な種類があり、脱硝触媒では主にFAが高速で衝突して触媒表面が削られるアブレシブ摩耗が生じていると考えられる。耐摩耗性の評価方法は、JISなどで対象物に応じた試験方法が規定されているが³⁾、脱硝触媒に応じた公定法はないため、微細な研磨剤を高速で衝突させるサンドブラストを応用した摩耗試験方法を検討した(図1,2)。

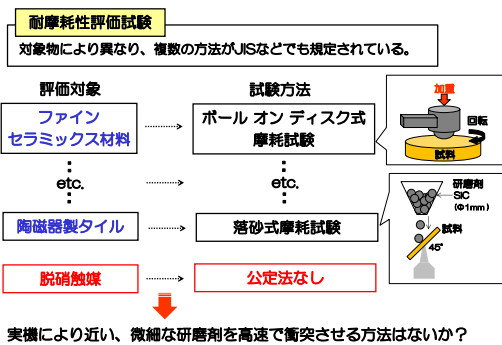


図1 耐摩耗性に関する各種評価方法

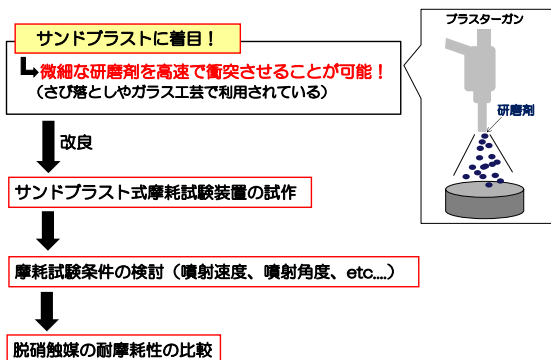


図2 サンドブラストを応用した評価方法の検討概要

3. サンドブラスト式摩耗試験装置の試作

試作したサンドブラスト式摩耗試験装置の外観を写真1、その概要を図3に示した。サンドブラスト式摩耗試験装置は、市販の小型サンドブラストを活用し、圧縮空気を用いてブラスターガンから触媒試料に研磨剤を噴射して所定条件での摩耗減量を評価する。なお、ブラスターガンから触媒試料片への噴射距離や噴射角度を任意に調整出来る構造とした。

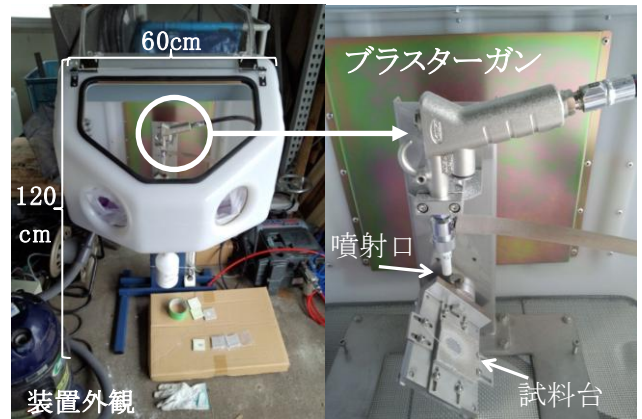


写真1 サンドブラスト式摩耗試験装置の外観

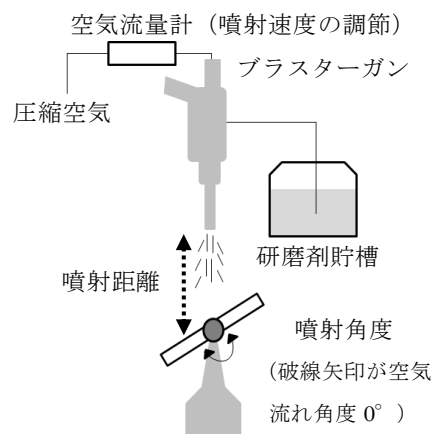


図3 サンドブラスト式摩耗試験装置の概要

4. 脱硝触媒の耐摩耗性評価条件の検討

4.1 試験方法

脱硝触媒の耐摩耗性評価条件の検討概要を図4、試験に用いた触媒試料の外観を写真2に示した。評価条件の検討は、サンドブラスト摩耗試験装置の装置条件(研磨剤、噴射時間など)を様々なに変化させ、摩耗減量や外観変化への影響を調査して脱硝触媒の耐摩耗性が安定的に評価できる条件を探索した。なお、触媒試料は塩化ビニル板(50mm×50mm)に張り付けたものを使用した。

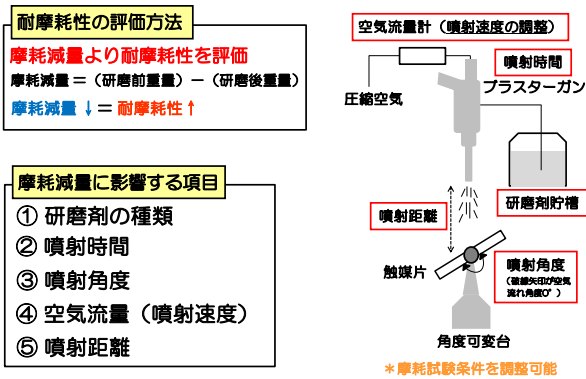


図4 脱硝触媒の耐摩耗性評価条件の検討概要

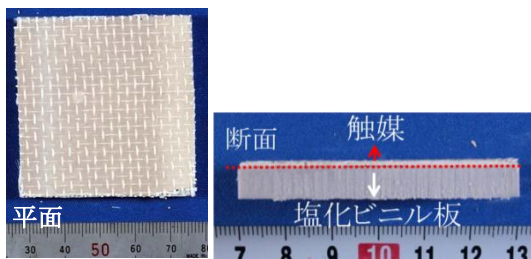


写真2 試験に用いた触媒試料の外観

4.2 試験結果

(1) 研磨剤の選定

脱硝触媒への摩耗は、FA粒子の中でも高粒径粒子による影響が大きいと考えられる。試験に用いたガラスビーズの粒度分布をFAと比較して図5に示した。ガラスビーズの粒度分布は、FAの粒度分布範囲にあり、目的とする粒子径であることが判る。また、ガラスビーズとFAの電子顕微鏡写真を図6、主要な化学成分を表1に示した。ガラスビーズはFAと同様の球状粒子であり、シリカが主成分で化学組成も比較的近いことが確認された。

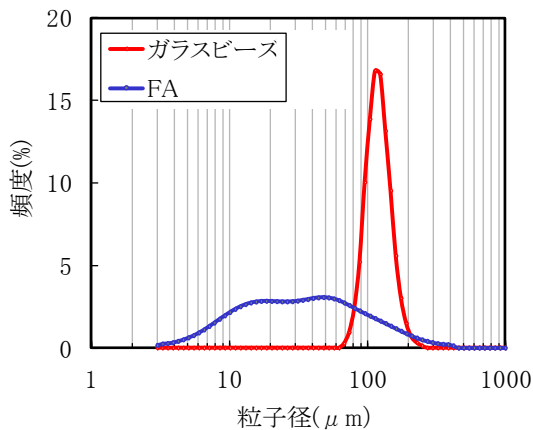


図5 ガラスビーズおよびFAの粒度分布

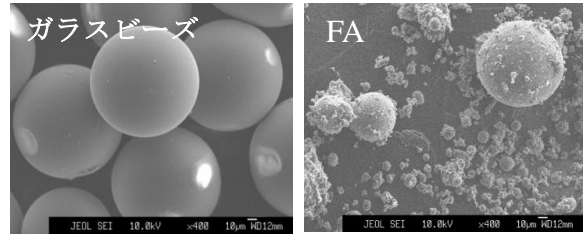


図6 ガラスビーズおよびFAの電子顕微鏡写真

表1 ガラスビーズおよびFAの主要な化学成分

	ガラスビーズ	FA
SiO ₂ (%)	60.3	65.3
Al ₂ O ₃ (%)	1.9	25.2
MgO (%)	5.3	1.4
Na ₂ O (%)	25.1	0.8

(2) 噴射時間

噴射時間を変化させた摩耗試験における噴射時間と摩耗減量との関係および試験後の試料外観を図7に示した。摩耗減量は、噴射時間に対して直線的に増加しており、噴射時間を調整すれば、脱硝触媒の耐摩耗性評価試験に適した摩耗量に調整できると考えられる。

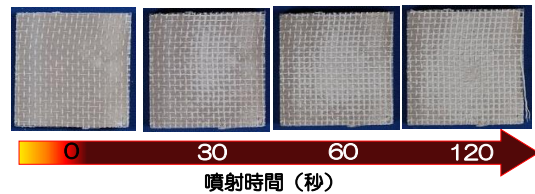
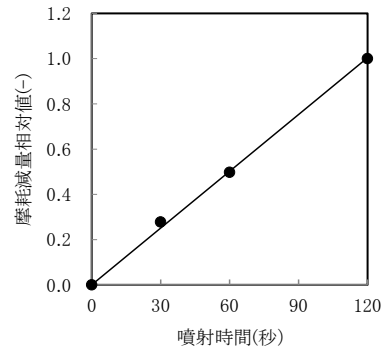


図7 噴射時間と摩耗減量との関係

(3) 噴射角度

噴射角度を変化させた摩耗試験における、噴射角度と摩耗減量との関係および試験後の試料外観を図8に示した。噴射角度を小さくすると研磨材が衝突する面積は減少し、摩耗減量も低下した。実機の脱硝触媒では、FAは触媒に0°程度で衝突するため、可

能な限り噴射角度は小さい方が望ましい。しかし、30°以下では研磨剤の一部が塩化ビニル板の側面に衝突し、触媒試料に適正に衝突しなかったため、脱硝触媒の耐摩耗性評価試験における噴射角度条件は30°とした。

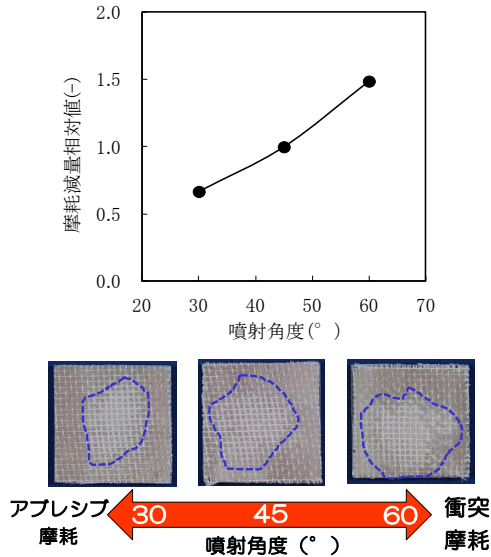


図8 噴射角度と摩耗減量との関係

(4) 空気流量(噴射速度)

空気流量を変化させた摩耗試験における、空気流量と摩耗減量の関係および試験後の試料外観を図9に示した。空気流量10L/minではほとんど摩耗が生じず、20L/minでは研磨剤が触媒試料の領域を超えて噴射されたため、脱硝触媒の耐摩耗性評価試験における空気流量条件は15L/minとした。

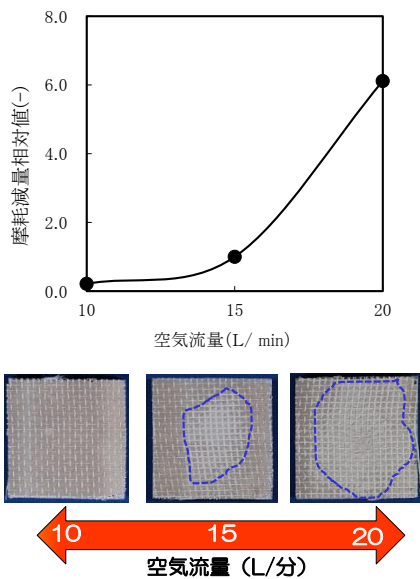


図9 空気流量と摩耗減量の関係

(5) 噴射距離

噴射距離を変化させた摩耗試験における、噴射距離と摩耗減量の関係および試験後の試料外観を図10に示した。噴射距離4.5cmでは狭く深い摩耗となった。一方、噴射距離14.5cmでは広く浅い摩耗となり、研磨剤が触媒試料の領域を超えて噴射された。噴射距離9.5cmでは比較的広い領域で摩耗し、摩耗減量も噴射距離4.5cmと同程度であることからバラツキが少ない試験値が得られると考え、脱硝触媒の耐摩耗性評価試験における噴射距離条件は9.5cmとした。

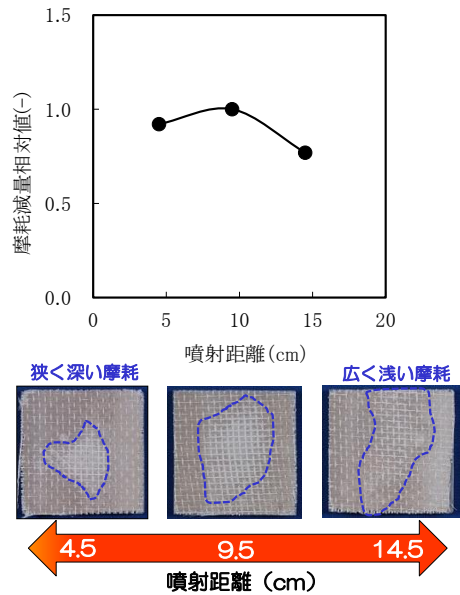


図10 噴射距離と摩耗減量との関係

(6) 脱硝触媒の耐摩耗性評価条件の決定

各種装置条件の検討結果から、サンドブラスト式摩耗試験装置を用いた脱硝触媒の耐摩耗性評価試験は、図11に示した装置条件で行うこととした。

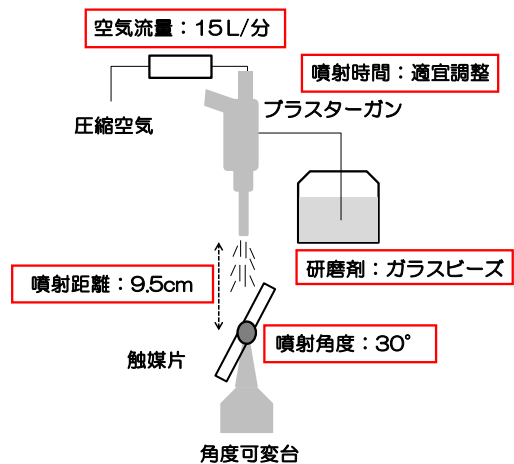


図11 サンドブラスト式摩耗試験装置の概略図

5. FA に対する脱硝触媒の摩耗性評価

(1) 試験方法

実機の脱硝触媒は、排ガス中の FA によって摩耗するため、サンドブラスト式摩耗試験装置を前述の装置条件に調整し、研磨剤に FA を用いた摩耗試験を行った。なお、バラツキ確認のため、FA およびガラスビーズを用いて同一条件で繰り返し測定を行った。

(2) 試験結果

研磨剤に FA およびガラスビーズを用いた脱硝触媒の摩耗試験結果を図 12 に示した。摩耗減量はいずれも噴射時間に対して直線的に増加することが確認された。また、いずれも触媒試料の中央部が摩耗するが、FA はより狭い領域でのみ摩耗しており、摩耗減量も少なく測定値のバラツキも増加する傾向が見られた。これは、FA 粒子は粒度分布幅が広く、脱硝触媒の摩耗への影響が大きいと考えられる高粒径粒子の割合がガラスビーズより少ないためと推定される。

従って、今回開発したサンドブラスト式摩耗試験装置を用いて、ガラスビーズで摩耗試験を行えば、バラツキが少なく比較的短時間で FA に対する脱硝触媒の耐摩耗性の評価が行える見通しが得られた。

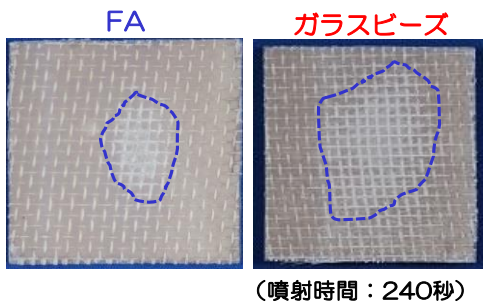
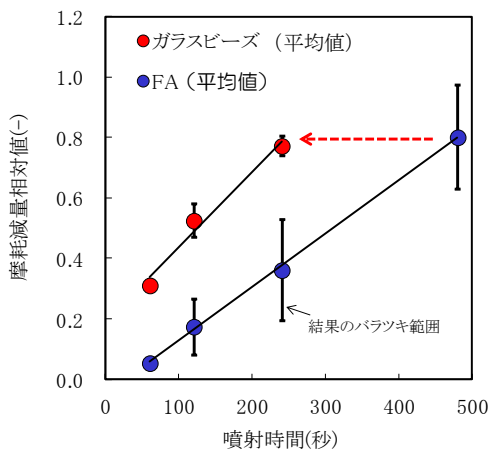


図 12 FA とガラスビーズを用いた摩耗試験結果

6. 触媒性状による耐摩耗性の評価

6.1 試験方法

(1) 触媒銘柄による耐摩耗性の相対評価

脱硝触媒は銘柄により耐摩耗性が異なることが知られている⁴⁾。そこで、サンドブラスト式摩耗試験装置を用いて、銘柄が異なる脱硝触媒の耐摩耗性の違いを評価した。

(2) 圧縮強度と耐摩耗性の関係

脱硝触媒は実機での使用に伴って焼結し、圧縮強度が変化することが知られている。そこで、実機使用した同一銘柄の脱硝触媒の圧縮強度を調査し、サンドブラスト式摩耗試験装置を用いて摩耗減量を測定し、圧縮強度との関係を調査した。

6.2 試験結果

(1) 触媒銘柄による耐摩耗性の相対評価

銘柄が異なる 4 種類の未使用の脱硝触媒の摩耗減量相対値を図 13 に示した。その結果、銘柄により脱硝触媒の耐摩耗性は異なることが確認され、サンドブラスト式摩耗試験装置を用いることで、銘柄の異なる脱硝触媒の耐摩耗性を相対評価できることが判った。

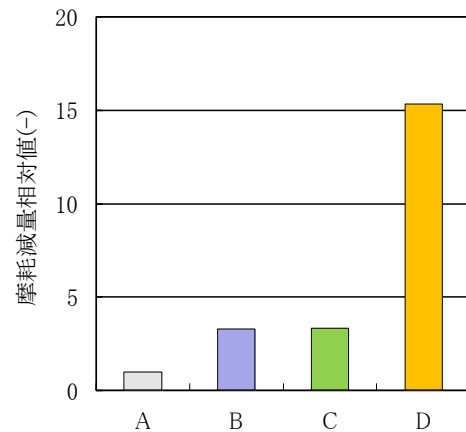


図 13 銘柄が異なる触媒における摩耗試験結果

(2) 圧縮強度と耐摩耗性の関係

サンドブラスト式摩耗試験装置を用いて同一銘柄の実機使用触媒の摩耗減量を測定し、圧縮強度との関係を調査した結果を図 14 に示した。脱硝触媒は実機での使用に伴って焼結するため、圧縮強度が上昇することが知られているが、圧縮強度の高い触媒ほど摩耗減量が小さくなることが判った。

媒の製造方法”, 2007-296449 (2007年11月15日公開)

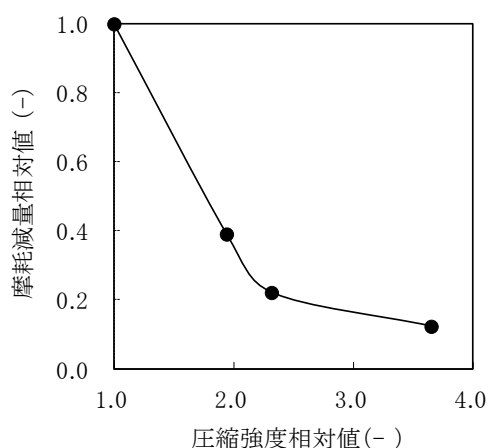


図 14 圧縮強度と摩耗減量の関係

7. まとめ

石炭火力発電所の排ガス中の NO_x 除去に用いられる脱硝触媒は、排ガス中に含まれる FA の衝突により摩耗・損傷する。そのため、脱硝触媒の交換時には、触媒性能のみならず耐摩耗性も考慮し触媒選定を行う必要があるが、脱硝触媒の耐摩耗性を評価する公定法はない。

本研究では、自社で脱硝触媒の耐摩耗性を評価するために、サンドブラストを応用した摩耗試験装置を開発した。開発したサンドブラスト式摩耗試験装置を用いれば、バラツキが少なく比較的短時間で FA に対する脱硝触媒の耐摩耗性の評価が行える見通しが得られた。また、本装置により、銘柄や圧縮強度が異なる脱硝触媒の耐摩耗性を相対評価できることが判った。

今後は、脱硝触媒取り換え時の触媒銘柄の選定の参考となるようにデータの蓄積を行う予定である。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力部殿の委託により実施したものであり、関係各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 環境機器活用辞典編集委員会 編集, ”大気汚染防止の技術と機器”, 65- 81 (1988)
- 2) 増田具承, 野地勝己, ”脱硝触媒およびその製造方法”, 2014-213307 (2014年11月17日公開)
- 3) JIS R 1613
- 4) 永井良憲, 伊藤和典, 山田晃広, ”板状脱硝触

電力建物における地震時の実挙動把握に向けた取り組み

～地震観測等に基づく評価事例～

(株)四国総合研究所 土木技術部	松田 耕作
(株)四国総合研究所 土木技術部	天野雄一郎
四国電力(株) 土木建築部	岡田 将敏
四国電力(株) 土木建築部	塩田 哲生
四国電力(株) 土木建築部	坂本 潤哉

キーワード： 固有振動数
減衰定数
システム同定
復元力特性
限界耐力計算

Key Words : Natural Frequency
Damping Factor
System Identification
Force-Displacement Relationship
Capacity Spectrum Method

Endeavors to Estimate Actual Behavior of Electric Power Buildings under Earthquake Load

-Evaluation case based on seismic observation-

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Kosaku Matsuda, Yuichiro Amano

Shikoku Electric Power Co., Civil & Architectural Engineering Department

Masatoshi Okada, Tetsuo Shiota, Junya Sakamoto

Abstract

It is very important to estimate actual behavior of existing buildings for judging safety and continuous usefulness of them. Analysis of seismic records observed in buildings is one of the effective methods in order to judge them.

In this paper, characteristics of vibration of a low office building were evaluated using seismic acceleration records observed in the building. They are natural frequency, damping factor, force-displacement relationship, story stiffness, etc. The variations of these factors indicate damage state of the building from earthquake. Capacity spectrum method, which was a simple dynamic analytical method, was also applied to the building. The responses of analysis were coincident with seismic records.

These results enable us to judge safety and continuous usefulness of buildings suffering from stronger earthquake ground motion by using seismic acceleration records observed in them.

1. はじめに

四国電力グループの建築部門では、1970年代から発電所等の重要施設の建物を対象として、地震観測に積極的に取り組んできた。当初は、建物の耐震設計手法の妥当性の検証と耐震安全性の確認とが主要な目的であった。その後、時代とともに、耐震安全性の確認には地震発生直後の迅速性が求められるようになった。また、近年では、2011年東北地方太平洋沖地震等を契機として、地震発生後の建物の機能維持や継続使用性の観点から、柱、耐震壁等の構造部材ばかりではなく、内外装材、天井材、設備機器、家具類等の非構造部材の健全性評価の重要性が指摘されるようになった。

ここでは、地震観測等に基づく地震時の実挙動把握に向けた取組みの一つとして、低層の事務所建物を対象とした事例を紹介する。観測で得られた加速度記録を用いることにより、建物に生じた変形量や作用した地震力の推定ができ、建物の損傷程度の判定が可能となり、安全性や継続使用性の定量的な評価につながることを示す。

2. 対象建物と地震観測装置の概要

対象とする建物の配置図を図1に、断面図を図2に、杭伏図を図3にそれぞれ示す。建物は、1980年2月に竣工した高松市東部の沿岸部に建つ地下1階地上6階建ての事務所ビルである。新耐震基準の施行前に設計されたもので、耐震補強は施されていない。構造は鉄筋コンクリート(RC)造、基礎は場所打ちコンクリート杭である。建物直下で実施されたボーリング調査によるN値分布を図4に示す。

この建物の新築当時は、1975年大分県中部地震等で中低層建物にしばしば被害が発生していた。しかしながら、高層以上の建物と比較して中低層建物での地震観測の実施例は非常に少なく、その実挙動には不明な点が多かった。そこで、耐震工学上有用なデータを取得し、四国電力の保有する各種建物の耐震性能の評価に資することを目的として、地震観測計画が立案された。

地震観測装置の加速度換振器の配置を図2中に示す。加速度換振器を建物内の床上3箇所(屋上階、3階、地下1階)と建物近傍の地盤内2箇所(GL-10m、GL-30m)の計5箇所に設置した。観

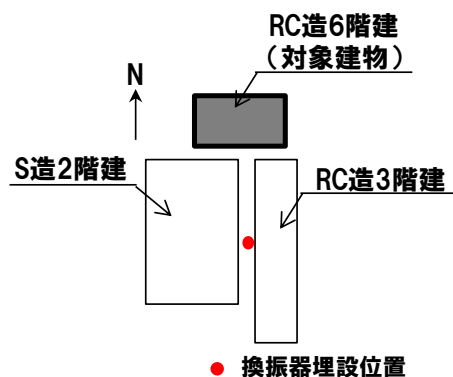


図1 建物配置図と地中換振器埋設位置

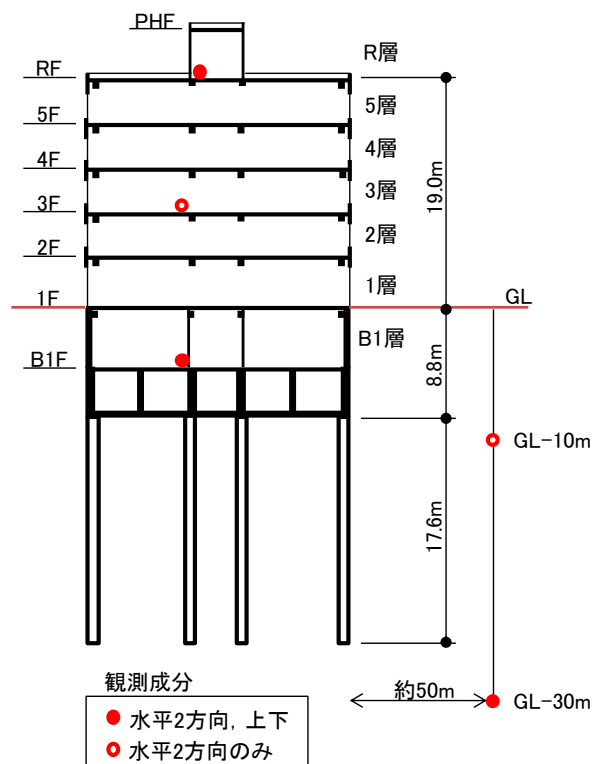


図2 建物断面図と換振器設置位置

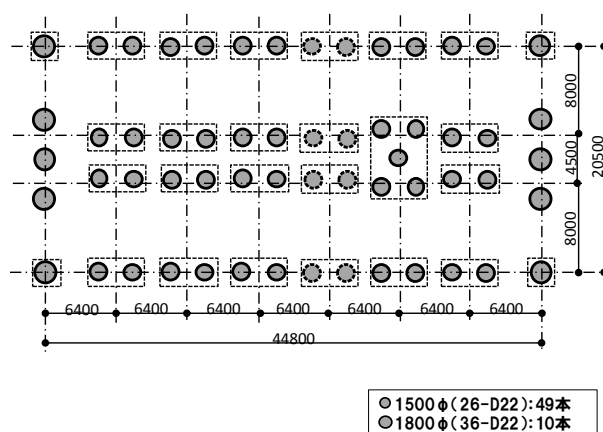


図3 杭伏図

測成分は、水平 2 成分が 5 個所全てと上下成分が 3 個所（屋上階，地下 1 階，GL-30m）の計 13 成分である。換振器を地中に埋設するためのボーリング孔を利用して、PS 検層を実施している。得られた地盤の弾性波速度分布を表 1 に示す。各換振器からの信号をケーブルにより 1 個所に集め、アナログ式のデータレコーダで時刻信号とともに磁気テープに記録した。観測期間は建物竣工から 2006 年 6 月までの約 26 年間であり、装置の老朽化により観測を終了するに至った。

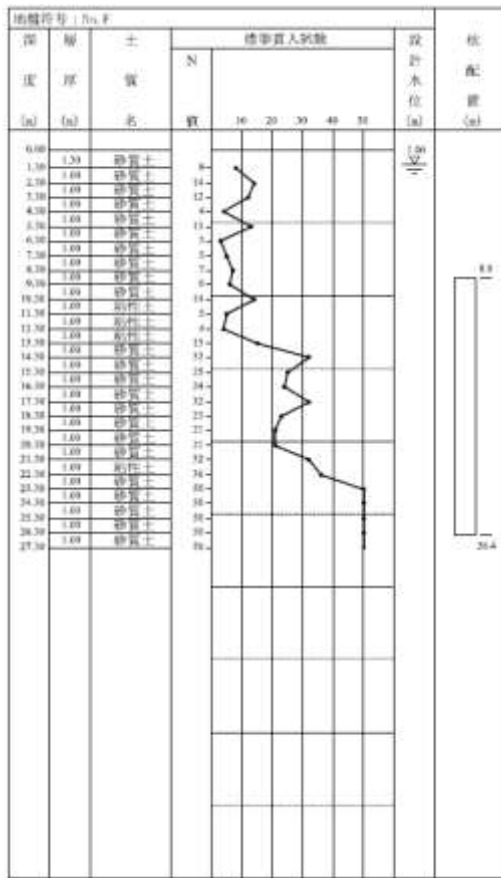


図 4 地盤の N 値分布

3. 観測記録

観測期間中に記録の得られた地震のうち主要な 11 地震について、発生日月日、震央地名、マグニチュード (M)、深さ等の震源要素を表 2 に示す。これらは全て気象庁のデータベース¹⁾に基づく。表中には、建物竣工後の経過年数、建物地点から震央までの距離及び建物地下 1 階 (B1F) で観測された最大加速度値も示した。震央距離の計算には、国土地理院の「測量計算サイト」²⁾を利用した。また、参考として示した気象庁震度は、高松气象台 (高松市伏石町) で観測されたものである。これらの地震の加速度記録を A-D 変換し、解析に使用した。

表中で揺れの最も大きかった NO.7 の地震 (1995 年兵庫県南部地震) の加速度時刻歴波形を図 5 に加速度応答スペクトルを図 6 に示す。この地震では、NS 方向 (建物短辺方向) の揺れが EW 方向 (建物長辺方向) に比べて約 2 倍も大きく、地下 1 階で約 100cm/s^2 、上層階で約 200cm/s^2 が観測されている。また、地下 1 階と GL-10m の応答スペクトルを比較すると、古くから知られているように、地盤の揺れに比べ建物内の基礎付近の揺れが小さめの傾向のある³⁾ことが、この記録においても確認される。その傾向は、NS (短辺) 方向に比べ EW (長辺) 方向でより顕著に現れている。

表 1 地盤の弾性波速度分布

地表面からの深さ(m)	せん断波速度(m/s)
0～9.8	160
9.8～16.2	220
16.2～24.5	330
24.5～30.5	490

表 2 観測記録の得られた主要な地震

NO.	発生日	経過時間 (年)	震央地名	M	深さ (km)	震央距離 (km)	B1F最大加速度(cm/s^2)			【参考】 気象庁震度 (高松市)
							NS (短辺)	EW (長辺)	上下	
1	1980/8/5	0.4	四国沖	4.7	50	97	2	4	2	1
2	1983/8/26	3.5	大分県北部	6.6	116	246	20	18	12	3
3	1983/10/31	3.7	鳥取県中部	6.2	15	119	11	24	7	3
4	1983/10/31	3.7	鳥取県東部	5.7	13	122	5	14	5	2
5	1984/5/30	4.2	兵庫県西南部	5.6	17	82	10	16	5	3
6	1994/8/22	14.5	紀伊水道	4.9	52	95	3	4	欠測	2
7	1995/1/17	14.9	大阪湾	7.3	16	91	101	55	欠測	4
8	1999/8/21	19.5	和歌山県北部	5.6	66	132	7	7	欠測	2
9	1999/10/30	19.7	瀬戸内海中部	4.6	13	64	10	7	欠測	2
10	2000/10/6	20.6	鳥取県西部	7.3	9	123	43	40	欠測	4
11	2001/3/24	21.1	安芸灘	6.7	46	186	65	44	欠測	4

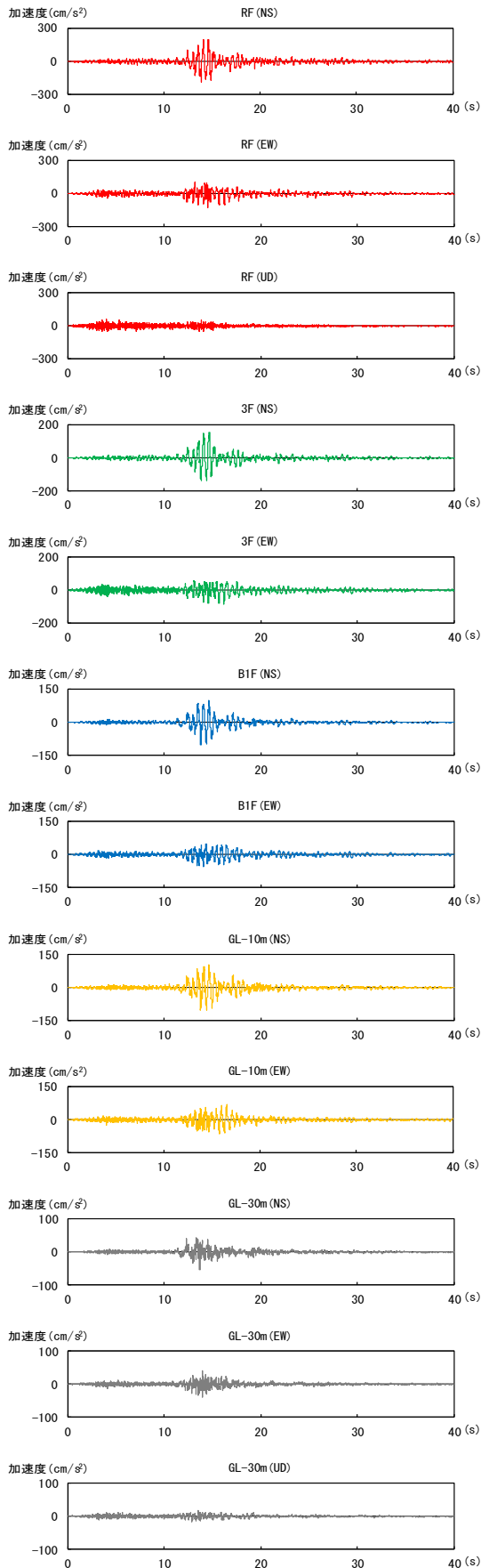


図5 観測記録の波形（1995年兵庫県南部地震）

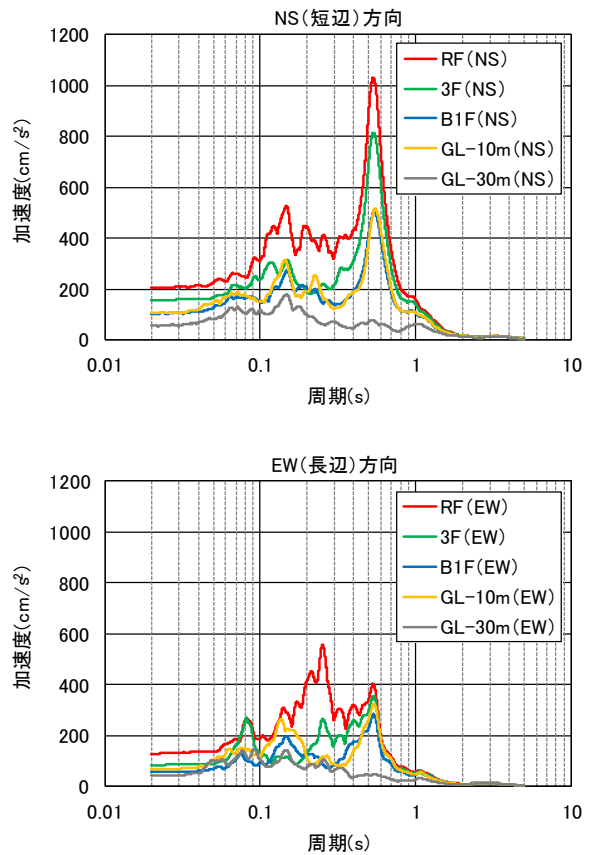


図6 観測記録の応答スペクトル
 （1995年兵庫県南部地震）

4. 固有振動数と減衰定数

4.1 概要

近年になり、建物での地震観測記録等の分析により、経年に伴いあるいは大地震経験後に建物の振動特性（固有振動数、減衰定数等）に変化の見られる事例⁴⁾⁵⁾⁶⁾が多数報告されるようになった。その分析手法として、ARXモデルによるシステム同定の手法⁷⁾⁸⁾がよく用いられている。

ここでは、この手法を表2に示した11地震の水平2方向の全記録に対して網羅的に適用し、この建物の振動特性の振幅依存性と経年変化との有無を検討した。

4.2 検討手法

システム同定とは、対象とする動的システムの入出力データの測定値から、ある目的のもとで、対象と同一であることを説明できるような、何らかの数学モデルを作成することをいう⁷⁾。数学モデルに相対するモデルが物理モデルと呼ばれるものである。建物等の構造物の動的解析で従来から扱われてきた質点系モデルや3次元FEMモデル

は、物理モデルに属する。物理モデルは、対象の挙動と物理量との関係が直接的であるメリットを有する。質点系モデルや3次元 FEM モデルの場合、質量、剛性、減衰定数等が物理量に相当する。反面、これらの物理量が不確かさを持つ場合、モデルの妥当性を客観的に示すのが困難となる。特に、減衰定数については、このことが当てはまる。また、質点系モデルと3次元 FEM モデルとを比べてみて明らかのように、対象の挙動を忠実に再現しようとするほど、モデルが複雑になる。それに対して、数学モデルは、多項式に代表されるように、モデル構成が単純で、恣意的な判断の入る余地が少なく、客観的なモデリングが可能となる。ただし、推定されるモデル係数と物理量との関係が直接的ではない点には注意を要する。

数学モデルの一つである ARX モデルは、次のような多項式で表現される。

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) \\ = b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) + w(k) \quad \dots (1)$$

ここで、 k は離散時間、 $y(\cdot)$ は出力、 $u(\cdot)$ は入力、 $w(\cdot)$ は白色雑音、 n_a 、 n_b は、モデル次数である。現時刻 k での出力 $y(k)$ を過去 n_a 個分の出力と n_b 個分の入力とで予測する。実測値と予測値との誤差が最小となるように、最小二乗法で係数 a 、 b を決定する。

m 次の固有振動数を有する物理モデルに対して、入力に地動加速度、出力に各質点の応答絶対加速度を採る場合、伝達関数 H はラプラス変換表現で式(2)のように表すことができる。

$$H(s) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{-\beta u_j s^2}{s^2 + 2h_j \omega_j s + \omega_j^2} \quad \dots (2)$$

ここで、 $\omega_j (=2\pi f_j)$ は j 次の固有角振動数 (f_j は j 次の固有振動数)、 h_j は j 次の減衰定数、 βu_j は出力の観測点の位置における j 次の刺激関数の値である。これを部分分数展開すると式(3)のように表現できる。

$$H(s) = 1 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{s r_j}{s - s p_j} + \frac{s \bar{r}_j}{s - s \bar{p}_j} - \beta u_j \right)$$

$$= {}_s k + \sum_{j=1}^m \left(\frac{s r_j}{s - s p_j} + \frac{s \bar{r}_j}{s - s \bar{p}_j} \right) \quad \dots (3)$$

ここで、 ${}_s p_j$ と ${}_s r_j$ は $H(s)$ の極と留数である。一方、同定されたARXモデルの伝達関数は、 z 変換表現で以下のように表される。

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = {}_z k + \sum_{j=1}^{n_a} \left(\frac{{}_z r_j}{1 - {}_z p_j z^{-1}} \right) \quad \dots (4)$$

ここで、 ${}_z p_j$ と ${}_z r_j$ は $H(z)$ の極と留数であり、 ${}_z p_j$ は $A(z)=0$ の根として、同定されたモデル係数 $a_j (j=1, 2, \dots, N_a)$ から求めることができる。

ラプラス変換表現の極 ${}_s p_j$ と z 変換表現の極 ${}_z p_j$ の間には、時間刻みを Δt として ${}_z p_j = e^{s p_j \Delta t}$ の関係が成り立つことから、この関係と式(3)、式(4)より、減衰定数 h_j 及び固有振動数 f_j は z 変換表現の極 ${}_z p_j$ を用いて以下のように導出される。

$$h_j = \frac{-\log|{}_z p_j|}{2\pi f_j \Delta t} \quad \dots (5)$$

$$f_j = \frac{|\log {}_z p_j|}{2\pi \Delta t} \quad \dots (6)$$

水平成分の各地震観測記録のうち振幅の大きい主要な部分を取り出し、計算対象区間とした。出力には屋上階 (RF)、入力には地下1階 (B1F) の記録をそれぞれ用いた。対象とする固有振動数における同定精度を向上させるため、データの前処理として、1~20Hz のバンドパスフィルタ処理と50Hz サンプリングへのデシメーション (間引きにより荒いサンプリングに変換) とを施した。モデルの次数は全て $n_a = n_b = 20$ とした。同定結果と比較するために、観測記録のフーリエ解析により、伝達関数を求めた。その際、一定の時間長さのフレームでオーバーラップさせながら分割し、各フレームの伝達関数をアンサンブル平均して算出した。各記録の1フレーム当りの時間長さは全て10.24秒、オーバーラップ比率は全て0.75とした。

4.3 検討結果

同定結果の一例として、表2中のNO.7の地震(1995年兵庫県南部地震)のものを図7に示す。

この地震の同定結果から得られた固有振動数を固有値解析結果と比較したものを表3に示す。固有値解析は地表面で完全固定としたモデルで実施した。また、同定結果から得られた1次モードにおける固有振動数と減衰定数とを全ての地震についてプロットしたものを図8及び図9に示す。減衰定数については、明らかに非現実的な値の出たものは除外した。

地震動の振幅が大きくなるほど、固有振動数はわずかずつではあるが低下している。経年変化については、固有振動数は長期間で見るとわずかずつ低下する傾向が見られる。しかし、最も大きかった1995年兵庫県南部地震の後に発生した地震の際には、固有振動数は再び回復しており、兵庫県南部地震による建物の損傷はなかったことがこのデータから確認される。

減衰定数については、最大のもので約2%程度であった。固有振動数に比べてばらつきが大きく、振幅依存性や経年変化が固有振動数ほど明確には現れなかった。しかし、30cm/s²程度以上の振幅のものだけを見ると、わずかながら振幅依存性がうかがえる。観測記録には基礎の回転の影響が含まれており、これがばらつきの原因の一つとなっている可能性がある。

表3 固有振動数の比較

	NO.7観測記録 (1995年兵庫県南部地震)	解析
NS(短辺)	3.0	3.2
EW(長辺)	3.8	3.3

単位: Hz

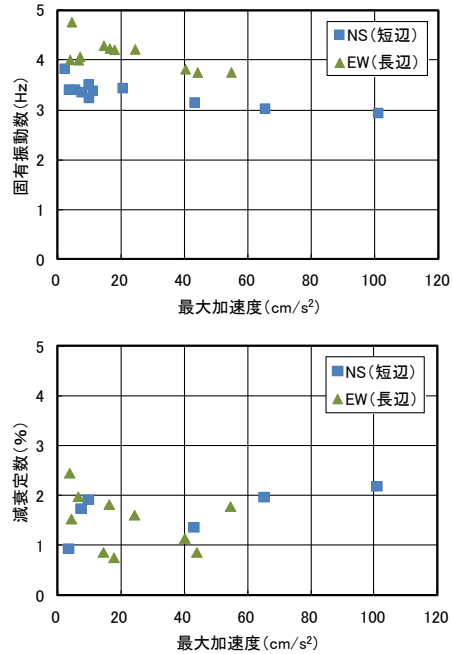


図8 固有振動数、減衰定数と最大加速度 (B1F) との関係

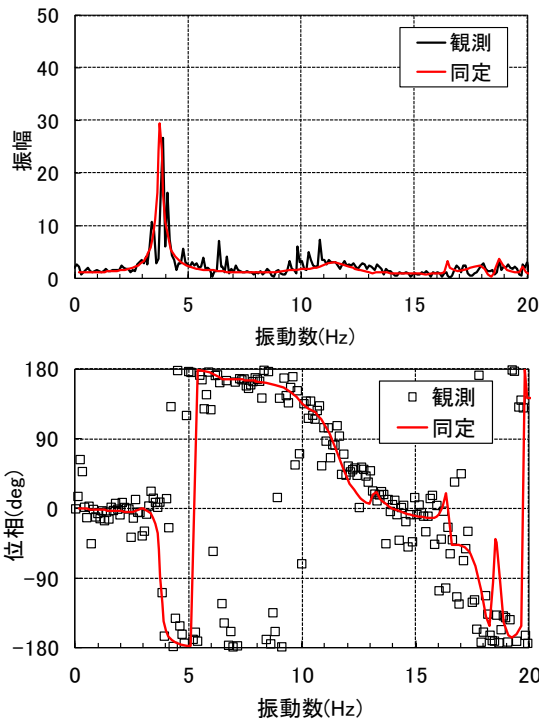
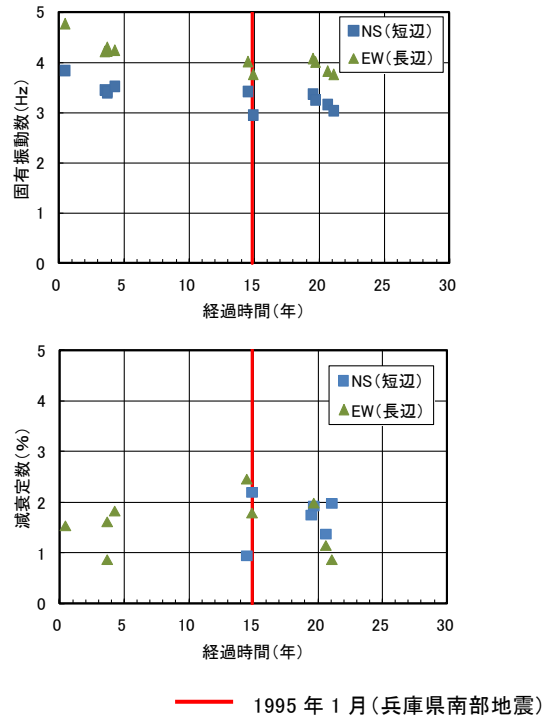


図7 システム同定結果の一例
 (1995年兵庫県南部地震 EW方向)



— 1995年1月(兵庫県南部地震)

図9 固有振動数、減衰定数と経過年数との関係

5. 復元力特性等

5.1 概要

近年になり、建物各階での地震観測記録から、地震力と建物の変形量との関係いわゆる復元力特性を直接求め、建物の層剛性等を評価する試みが報告されるようになった⁹⁾。この手法は、建物の解析モデルの剛性評価の妥当性の確認やモニタリングによる建屋の健全性評価に活用できる可能性がある。

ここでは、既往の文献等を参考にして、加速度記録から復元力特性を求め、層剛性、減衰定数等の評価を試みた。

5.2 検討手法

揺れの最も大きかった N0.7 の地震（1995 年兵庫県南部地震）の建物各階の床加速度記録を用いて各層の層間変位と層せん断力を算定し、層せん断力ー層間変位関係を求めた。加速度換振器の設置されていない階については、上下階の加速度記録を時刻歴上で高さ方向に直線補間することで補った。

層間変位は、加速度記録を時刻歴上で 2 回積分することにより各階の変位を求め算定した。積分計算においては、大崎のプログラム¹⁰⁾を参考にした。

層せん断力は、加速度時刻歴に各階の質量を乗じて各階に作用する慣性力を求め算定した。さらに、地上第 1 層の層せん断力の最大値を層せん断力係数（ベースシア係数）に換算した。また、地下 1 階で観測された最大加速度を震度換算したものを地下震度とみなした。これらにより、建物に作用した地震力を推定した。

5.3 検討結果

1 層目の層間変位の時刻歴波形のうち、最も振幅の大きかった 10～20s の区間について図 10 に示す。また、同じ区間の層せん断力ー層間変位関係を図 11 に示す。

図 11 に示した履歴ループから最大振幅付近での層剛性を求めた。その結果を解析で得られたものと比較して表 4 に示す。観測記録から評価した 1 層目の層剛性は概ね解析値と対応しているものの、NS（短辺）方向は解析よりもやや小さく、EW（長辺）方向はやや大きめの値となった。両者の傾向の差は、NS 方向の入力が EW 方向に比べて約 2 倍も大きかったことと、短辺方向の観測記録に

は長辺方向に比べて基礎の回転の影響がより多く含まれていると推測されることが影響していると考えられる。

1 層目の層間変位の最大値を層間変形角に換算すると、NS（短辺）方向が約 1/3000、EW（長辺）方向が約 1/10000 となる。これらの値は、この建物の構造部材を保守的にせん断破壊型としたときの終局時の層間変形角¹¹⁾である 1/250 と比べると 1 桁以上小さい。また、変形依存型の非構造部材に被害が発生するとされている層間変形角¹²⁾である 1/125 と比べてもはるかに小さい。

最大振幅付近での履歴ループの面積から、式 (7) を用いて等価粘性減衰定数¹³⁾の評価を試みた。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\Delta W}{W_e} \right) \quad \dots (7)$$

ここで、 ΔW は履歴ループの 1 サイクルの面積、 W_e は等価ポテンシャルエネルギーである。等価粘性減衰定数は NS（短辺）方向が 3.5～7% 程度、EW（長辺）方向が約 6% となった。これらの結果から、この地震においてこの建物は瞬間的に 5% 程度の減衰定数となった可能性がある。ただし、これには地盤への逸散減衰や表層地盤の非線形性が含まれていることに留意する必要がある。

ベースシア係数と地下震度を表 5 に示す。地震動のより大きかった NS（短辺）方向のベースシア係数は、現行の耐震基準で規定されている 1 次設計のベースシア係数（0.2）の 8 割程度の地震力が作用したと推定される。ベースシア係数に対する地下震度の比は、両方向ともに 0.6～0.7 程度で、EW（長辺）方向の方が NS（短辺）方向に比べて若干大きめの結果となった。

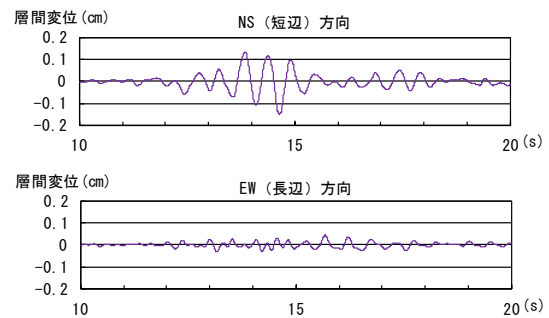


図 10 層間変位の波形（地上 1 層目）

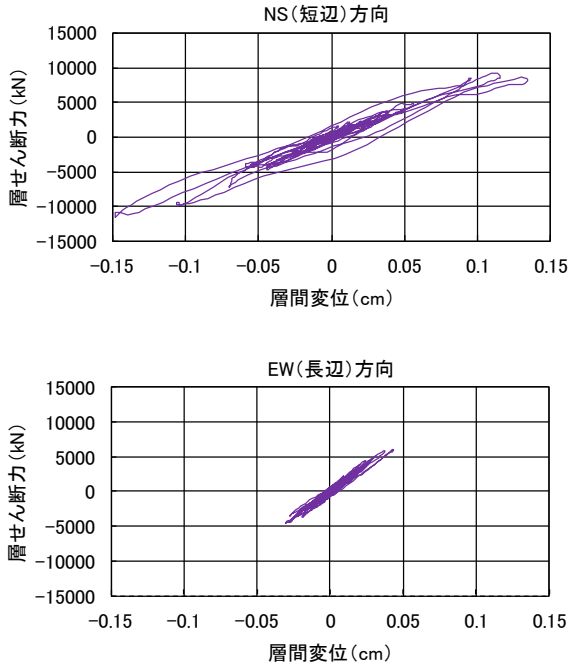


図 11 層せん断力ー層間変位関係（地上 1 層目）

表 4 層剛性の比較（地上 1 層目）

単位: kN/cm

	NO.7 観測記録 (1995年兵庫県南部地震)	解析
NS(短辺)	78,000	88,000
EW(長辺)	144,000	106,000

表 5 ベースシア係数と地下震度

	A. 第1層の層せん断力係数 (ベースシア係数)	B. 地下震度	B/A
NS(短辺)	0.161	0.103	0.637
EW(長辺)	0.084	0.056	0.665

6. 限界耐力計算との比較

6.1 概要

この建物の耐震設計において動的解析は実施されてはいない。しかし、地震観測によって得られた記録そのものからの分析のみではなく、解析とも比較することは、実挙動を考察するうえで重要である。

ここでは、動的な特性を簡便に考慮できる解析である限界耐力計算の手法を適用し、その結果を観測記録と比較した。

6.2 検討手法

限界耐力計算¹⁴⁾は、従来の保有水平耐力計算において直接には考慮されていなかった変形量を耐力と同時に評価できる手法として、2000年6月に改正された建築基準法で導入された。

入力地震動について、応答スペクトルを S_a-S_d 曲線で表す。この際、式(8)～(9)により、建物の塑性化の状況に応じた建物の減衰定数 h の変化を反映させた応答値の低減率 Fh を考慮する¹⁵⁾。

$$Fh = \frac{1.5}{1+10h} \quad \dots (8)$$

$$h = \gamma_1(1-1/\sqrt{Df}) + 0.05 \quad \dots (9)$$

$$Df = \frac{\Delta s Qd}{\Delta d Qs} \quad \dots (10)$$

ここで、 γ_1 は部材の構造形式に応じた減衰特性を表す係数 (RC 造, SRC 造: 0.25, S 造: 0.2), Df は建物の塑性の程度を表す係数, Δs は建物の代表変位, Qd は建物の損傷限界耐力, Δd は建物の損傷限界時の代表変位, Qs は代表変位が Δs の時の建物の応力である。

建物側については、建設省告示 (平 12 建告第 1457 号第 8) で定められた地震時の外力分布による静的弾塑性増分解析を行い、各階の変位分布と質量分布とから、等価 1 自由度系の荷重ー変位関係 (耐力スペクトル) を算出する。入力地震動の S_a-S_d 曲線と建物の耐力スペクトルとの交点として、等価 1 自由度系の応答変位と応答加速度が求められる。実際の計算においては、固有周期を仮定し、これに対応する等価 1 自由度系の応答変位から、塑性率→減衰定数→応答の低減率→応答変位を順次求め、繰り返し計算により応答変位を収束させ、収束した応答変位と応答加速度から得られる固有周期を用いて再び計算するという操作を固有周期が収束するまで繰り返すという手順を踏む。収束計算の結果得られる 1 自由度系の応答変位と応答加速度は、1 自由度系に変換する前の各階の変位分布と加速度分布とを用いて再び各階の応答変位と応答加速度に変換させる。

弾塑性増分解析においては、予め設定された限界値に層間変形角が最初に到達した層を最弱層として特定した。この時の各階の基礎からの変位の分布と質量分布とを用いて式(10)で算定した有効質量 Mu_s を等価 1 自由度系の質量とした。

$$Mu_s = \frac{(\sum m_i \delta s_i)^2}{\sum m_i \delta s_i^2} \quad \dots (10)$$

ここで、 m_i は第 i 階の質量 (ton)、 δs_i は最弱層が限界値に達した際の第 i 階の基礎からの変位 (m) である。最弱層の層せん断力と層間変位との関係を等価 1 自由度系の荷重-変位関係と同等なものとし、荷重については、ステップごとに上記の有効質量で除して加速度に変換し、耐性スペクトルとした。弾塑性増分解析においては、ペントハウス階 (PHF) はモデル化せず、質量のみ屋上階 (RF) に付加した。また、地下部分の存在は無視し、1 階床面は完全固定と見なした。

6.3 検討結果

静的弾塑性増分解析の結果を図 12 に示す。この結果から、両方向ともに最弱層は地上第 1 層 (1 階床～2 階床) と特定された。

限界耐力計算の結果得られた等価 1 自由度系の応答値を図 13 に示す。荷重-変位曲線上の交点の位置から、建物の応答はほぼ弾性範囲に留まっていたと推定される。この結果を各階層へ分配して得られた層間変形角と床加速度を観測記録と比較して図 14 及び図 15 に示す。観測記録の層間変形角と床加速度とは、5.2 節に示した手法により求めたものである。限界耐力計算から算定された応答値のうち、NS (短辺) 方向は全般的に観測記録に比べて小さめの結果となった。この主たる原因は、NS (短辺) 方向の観測記録には EW (長辺) 方向に比べて基礎の回転による影響が多く含まれていることによるものと考えられる。

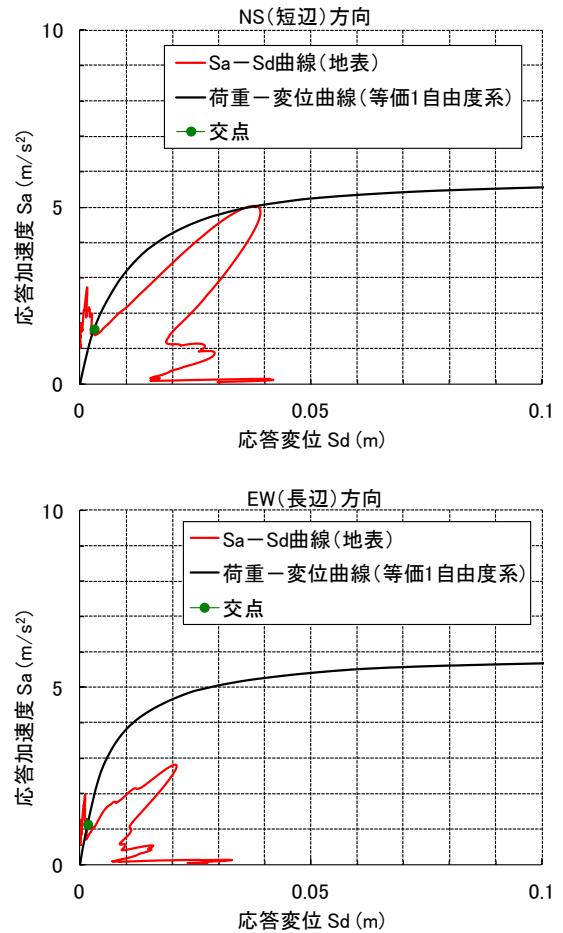


図 13 限界耐力計算結果

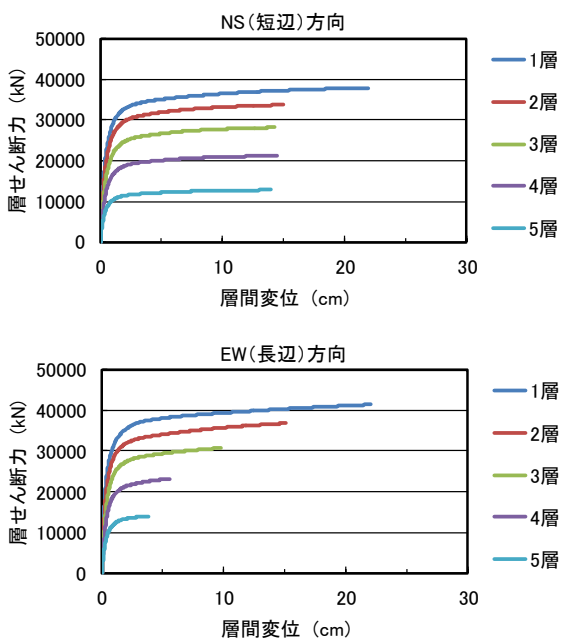


図 12 静的弾塑性増分解析結果

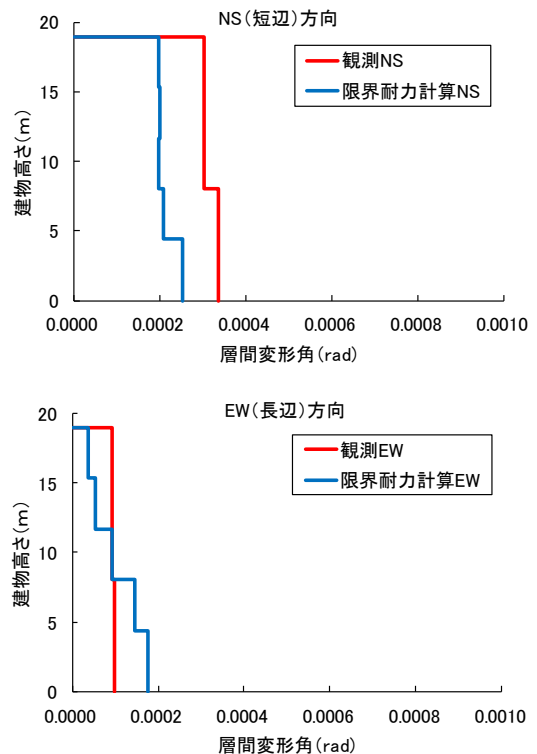


図 14 層間変形角の比較

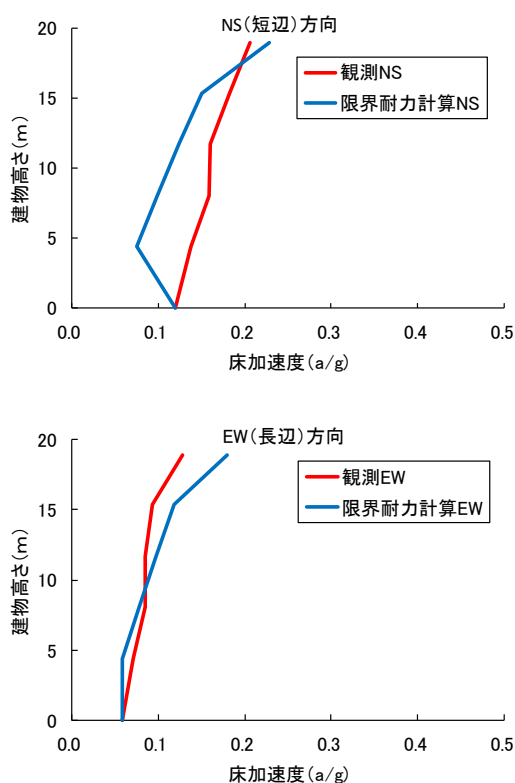


図 15 床加速度の比較

7. まとめ

建物の設計時に動的解析が適用されていたか否かにかかわらず、既存建物の実挙動を把握することは、建物の安全性や継続使用性をより定量的に評価するのに重要である。建物での地震観測記録の分析はその有効な手段の一つである。

ここでは、低層 RC 造の事務所建物を対象として、地震観測記録から建物の固有振動数、減衰定数、復元力特性、剛性等種々の振動特性の評価を試みた。また、限界耐力計算の手法に基づく解析結果とも比較し、観測記録の分析結果の妥当性に考察を加えた。紹介した事例は、建物の応答がほぼ弾性範囲に留まるものであったが、用いた手法は建物が塑性域に入るようなより大きな地震の発生後の建物の健全性確認に適用することも十分に可能である。なお、紹介した事例は建物内での観測記録を中心とした検討に過ぎない。今後、地盤内の記録も含めた総合的でより詳細な検討に発展させる余地がある。

【謝辞】

観測記録のデータ整理、各種ツールの開発及び検討の実施に際して、(株)大崎総合研究所、(株)構造

計画研究所、ユースエンジニアリング(株)及び(株)四電技術コンサルタントの各社に多大なご協力をいただきました。また、高知工科大学甲斐教授からは、内容に関して貴重なご意見を賜りました。これらの関係各位に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 気象庁：
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/>
- 2) 国土地理院：<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>
- 3) 田治見宏：建築振動学，コロナ社，pp.117-119，1965
- 4) 尾形芳博他：ARX モデルによる中小地震時の建屋初期剛性の経年的変化に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.983-984，2011
- 5) 日本建築学会：大振幅地震動と建築物の耐震性評価 巨大海溝型地震・内陸地震に備えて，pp.97-103，2013
- 6) 森田高市，鹿嶋俊英：強震観測に基づく建物・地盤相互作用の影響を考慮した減衰定数の評価，日本地震工学会論文集第 16 巻，第 9 号，pp.1-12，2016
- 7) 足立修一：システム同定の基礎，東京電機大学出版局，pp.9-14，pp.98-103，2009
- 8) 斎藤知生：モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定，日本建築学会構造系論文集，1998
- 9) 海野元伸，福和伸夫，飛田 潤：高密度強震観測・振動実験に基づく PCaPC 造建物の層及び基礎-地盤系の復元力特性評価，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.361-362，2011
- 10) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp.246-250，1994
- 11) 日本建築防災協会：2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説，pp.112-133，2001
- 12) 高橋雄司：簡易シミュレーションによる建築物の地震リスク分析，構造工学論文集 Vol.50B，pp.453-463，2004
- 13) 柴田明徳：最新耐震構造解析 第 2 版，森北出版，pp.48-49，2003
- 14) 国土交通省住宅局建築指導課他：2001 年版 限界耐力計算法の計算例とその解説，工学図書，2001
- 15) 建築行政情報センター，日本建築防災協会：2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書，pp.468-471，2015

長距離配電線に対応したメガソーラー発電の 無効電力制御による電圧変動抑制の実証試験

(株)四国総合研究所 電力技術部	河野 高一郎
(株)四国総合研究所 電力技術部	曾我部 剛
四国電力(株) 配電部	伊藤 勝志
日新電機(株) ソリューション設計部	長瀬 只雄
徳島大学 ソシオテクノサイエンス研究部	北條 昌秀

キーワード： 太陽光発電
配電線
電圧変動
無効電力制御
電圧制御

Key Words : Photovoltaic generation
Distribution line
Voltage variation
Reactive power control
Voltage control

Verification Test of Reactive Power Control of Mega-solar System for Voltage Regulation with Long Distribution Line

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technology Dept.
Kouichiro Kouno and Tsuyoshi Sogabe
Shikoku Electric Power Co., Inc., Distribution Dept.
Katsushi Itou
Nissin Electric Co., Ltd., Engineering & Design Dept.
Tadao Nagase
Tokushima University, Institute of Technology and Science
Masahide Hojo

Abstract

Constant power factor control of a power conditioning system in a large-scale photovoltaic generation system (PV system), such as a mega-solar system, is introduced to mitigate voltage variations on a distribution line. However, it is difficult for the control to mitigate the voltage variation on a long distribution line because of the loss on the distribution line. This paper deals with an advanced reactive power control method, in which the power factor of the PV system is adjusted both by active power of the PV system and by apparent power of loads to minimize the voltage variation not at the interconnection point but over the whole distribution line. In addition, the effectiveness of the reactive power control for voltage regulation is verified by an experiment using a real 6.6kV distribution system. As a result, it is confirmed that the proposed method can mitigate the voltage variation sufficiently.

1. はじめに

近年、地球環境問題への対応やエネルギー源の多様化による安定供給の確保から再生可能エネルギーの導入が積極的に進められている。

メガソーラー発電など大規模太陽光発電 (PV) が配電系統に連系された場合、メガソーラー発電の出力変動に伴う配電系統の電圧変動が懸念されるが、この問題の対策の1つとして風力発電で実績のある無効電力制御 (力率一定制御) があり¹⁾、太陽光発電 (PV) 大量連系時の検討事例^{2),3)} やメガソーラー発電においてもパワーコンディショナ (PCS) の力率一定制御を用いた電圧変動抑制対策の適用例が見られる⁴⁾⁶⁾。また、メガソーラー発電連系時の電圧変動抑制対策として、新たな無効電力制御も検討されている^{7),8)}。

筆者らはメガソーラー発電連系時の電圧変動抑制対策として、PCS の力率一定制御を適用した場合の効果について、シミュレーション⁹⁾ および実系統を用いた実測結果¹⁰⁾ により検討し、連系箇所が変電所から 5km 程度のケースであれば、電圧変動は十分抑制される見通しを得た。一方、亘長が 10km を超過した長距離配電線では出力変動に伴う線路ロスが大きく、電圧変動抑制対策として適用しがたいことがわかった¹¹⁾。

このため、長距離配電線におけるメガソーラー連系時の電圧変動抑制対策として、PV 出力および配電線負荷に応じて PCS の力率を変更する新たな無効電力制御手法 (力率変更制御) を提案し、モデル系統を用いたシミュレーションによりその電圧変動抑制効果を確認した¹²⁾。

本稿では、提案した力率変更制御について、6.6kV の実配電系統を用いた実証試験により電圧変動抑制効果を検証した結果を報告する^{13),14)}。

2. 力率一定制御 (従来手法)

2.1 制御の概要

PV が配電線に連系した場合の電圧変動抑制対策として、従来手法である PCS の力率一定制御の電圧変動の特性を検討した。この制御では、(1)~(3) 式に従い、PCS より出力される無効電力 Q_{PV} を常時一定力率 $\cos\theta$ で制御するものである。

$$Q_{PV} = \alpha P_{PV} \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = \sqrt{1/\cos^2\theta - 1} \dots\dots\dots (2)$$

$$= \text{const.} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 P_{PV} : PV の出力 [W], Q_{PV} : PV の無効電力 [var], θ : 力率角 [rad]

2.2 配電系統モデル

力率一定制御適用時の電圧変動の特性をシミュレーションにより検討する。

図 1 にシミュレーションに用いた配電系統モデルを示す。4 章に示す実証試験を行った試験系統を模擬した。

定格出力 1,742kW のメガソーラー発電所 (PS) を亘長 12.8km の 6.6kV 配電線の末端に連系トランスを介して連系した。配電線には最大 3.5MW の負荷および定格出力の合計が 0.9MW で力率 1 制御の低圧 PV と、定格出力の合計が 0.6MW で力率一定制御により力率が合計で 0.85 となる高圧 PV が分散して接続されている。変電所から 10.8km 離れた地点と変電所との間に負荷と PV が接続されている。

配電用変電所 (SS) から発電所間の高圧線の線種は大部分が ALOC120mm² (0.956+j1.634 [%/km] (1,742kVA 基準)) であった。シミュレーション上のノードは実系統の手動開閉器毎に設置した。その間隔は約 0.5km であった。区間内の負荷、PV はノードにまとめて接続した。

PV を除いた負荷は図 8 に示した負荷動作直線を変動するものとして、負荷の力率を重負荷時 (3.5MVA (300A)) に 1.00、軽負荷時 (1.7MVA (150A)) に進み 0.64 とした。

変電所の送出電圧は目標値である 6,690V 一定とした。

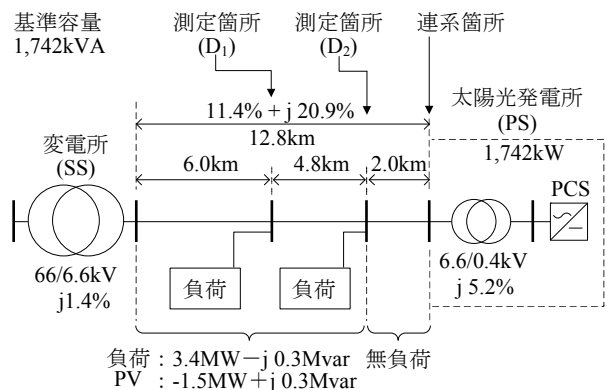


図 1 試験系統を模擬した配電系統モデル

測定箇所は変電所，変電所から 6km 離れた配電線上のポイント D₁，10.8km 離れたポイント D₂，発電所の 4 箇所とした。

発電所の力率は PCS 出力端 (0.4kV) において発電設備側からみて進み 0.80~1.00 の範囲で変化させた。PV・負荷の電圧特性は定電力特性とした。

2.3 シミュレーション結果

図 2 に，図 1 のモデル系統に電圧変動を最小に抑制する最適力率 0.924 にて定格出力 1,742kW の発電所を連系した場合の，発電所の出力と電圧変動の関係を示す。電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ を (4) 式で定義する。

$$\Delta V_{P,S,n} = V_{P,S,n} - V_{S,n} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし， $V_{P,S,n}$ ：発電所の出力 P ，負荷と既連系 PV の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]， $V_{S,n}$ ：発電所連系前，負荷と既連系 PV の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]

既連系 PV の出力として 0MW 出力および最大出力 (1.5MW) を考慮した。電圧変動の観測箇所として，発電所の連系により最も電圧が上昇した箇所 (変電所より 10.8km 離れた測定箇所：D₂) および発電所の連系により最も電圧が低下した箇所 (連系箇所：PS) の 2 点を選択した。

配電線のインピーダンスは 1,742kVA ベースで 11.4+j20.9 [%] となり，出力 1,742kW，力率 1 の発電所の連系により電圧は簡易計算により 11.4%上昇する。

図 2 においてどちらの観測箇所においても発電所の出力の増加とともに電圧変動のグラフは上に凸となった二次関数で示される曲線上を変化した。すなわち，発電所の出力の上昇とともに電圧変動も徐々に上昇するが，発電所の出力が 0.5pu (1,742kVA 基準) を超えると，電圧変動は下降に転じる結果となった。また，負荷の増加とともに電圧変動のグラフは上方向に移動した。

図 3 に負荷と電圧変動の関係を示す。系統・負荷条件とも図 2 と同一とした。負荷の増加とともに電圧変動のグラフは傾きを正とした一次関数に近い形で変化した。これより負荷の増加とともに

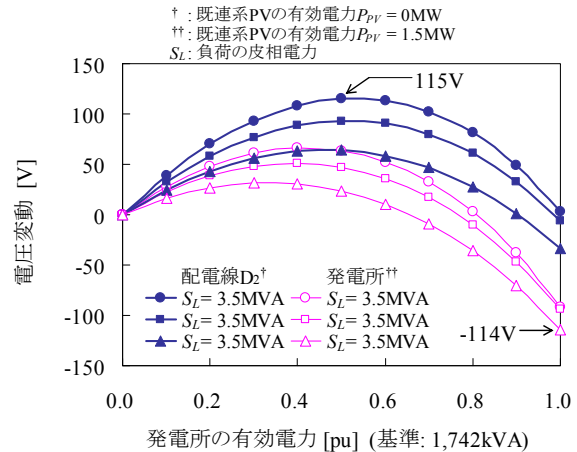


図 2 力率一定制御における発電所の有効電力と電圧変動の関係

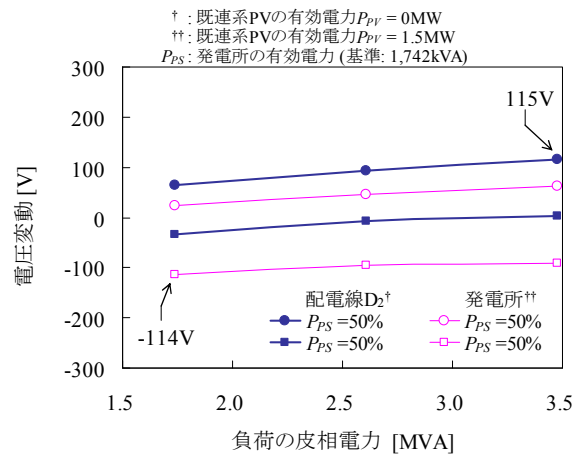


図 3 力率一定制御における負荷の皮相電力と電圧変動の関係

に電圧変動の値が上昇していることがわかった。図 2，図 3 のグラフより，以下の特性 (i),(ii) が明らかとなった。

- (i) 発電所の出力の増加とともに，電圧変動は上へ凸状に変化 (電圧変動は発電所の出力の二次関数)
- (ii) 負荷の増加とともに，電圧変動は上昇 (電圧変動は負荷の一次関数)

上記の特性の要因は線路電力損失変動の影響であり，線路のインピーダンスおよび発電所の出力が増大するほど，この特性が強くなることがわかった。以下にその理由を示す。

線路電力損失変動 $\Delta P_{LOSS,P,S,n}$ を (5) 式で定義

する。また、ノード n に生じる電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ は (6) 式で記述される。

$$\Delta P_{LOSS,P,S,n} = P_{LOSS,P,S,n} - P_{LOSS,S,n} \dots\dots(5)$$

$$\Delta V_{P,S,n} \doteq \sum_{i=1}^n (r_i P_{PS} - x_i Q_{PS} - \underbrace{n \Delta P_{LOSS,P,S,n}}_{\text{線路電力損失変動}} - \underbrace{x_i \Delta Q_{LOSS,P,S,n}}_{\text{無効電力変動}}) \dots\dots(6)$$

ただし、 $P_{LOSS,P,S,n}$: 発電所の出力 P , 負荷と既連系 PV の皮相電力 S におけるノード n から系統末端間における線路電力損失 [W], $P_{LOSS,S,n}$: 発電所連系前, 負荷と既連系 PV の皮相電力 S におけるノード n から系統末端間における線路電力損失 [W], $r_n + jx_n$: ノード $n-1 \sim$ ノード n 間の線路インピーダンス [Ω], P_{PS} : 発電所の有効電力[W] (発電時: 正), Q_{PS} : 発電所の無効電力[var] (進相運転時: 正)

発電所の連系に伴う電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ を抑制するため、(6) 式の下線部が 0 となるよう発電所の力率 (無効電力) を調整すると、電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ は、(6) 式の下二重下線部, すなわち、線路電力損失変動の影響を受けることとなる。

図 1 の配電システムモデルに対して、力率一定制御のもと、定格出力 1,742kW の発電所が連系した場合の発電所の有効電力と線路電力損失変動の関係を図 4 に、負荷の皮相電力と線路電力損失変動の関係を図 5 に示す。線路電力損失変動は配電線全体の値とした。

線路電力損失変動は発電所の有効電力の二次関数、負荷の皮相電力の一次関数となっており、この影響を受けて発電所の連系に伴う電圧変動は特性 (i),(ii) を帯びることがわかった。

3. 力率変更制御 (提案手法)

3.1 制御方法

従来手法である力率一定制御では 2 章の結果より、連系箇所が変電所から遠く、発電所の出力が大きい場合には線路電力損失変動が大きくなり、電圧変動を十分抑制できないことがわかった。

このため、提案する無効電力制御では、発電所の連系時の線路電力損失変動に影響を与える発電所の出力や配電線の負荷にあわせて、電圧変動

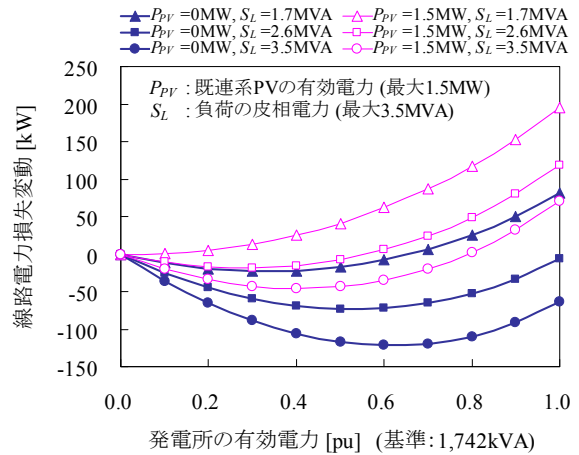


図 4 力率一定制御における発電所の有効電力と線路電力損失変動の関係

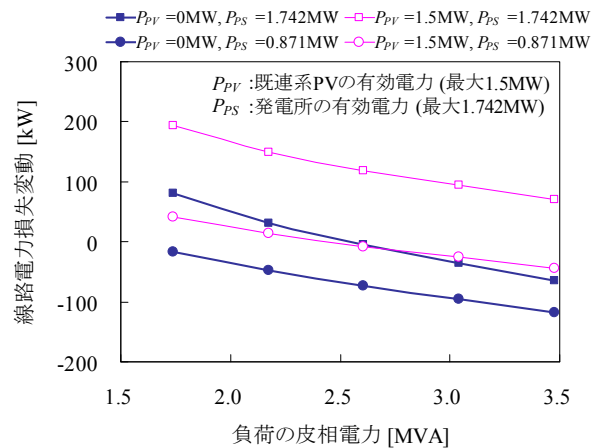


図 5 力率一定制御における負荷の皮相電力と線路電力損失変動の関係

を最小とする力率に都度変更する方法とした (力率変更制御)。

ここで、発電所の連系箇所の電圧変動を最小とするよう無効電力を調整すると、線路電力損失変動の位置的なばらつきの影響を受けて配電線中間部で電圧が大きく低下することがあることから (図 7, 方式 2), 配電線全域の電圧変動が最小となるよう無効電力を調整することとした。

制御の特徴を (7)~(10) 式に示す¹²⁾。

$$Q_{PV} = \alpha P_{PV} \dots\dots(7)$$

$$\alpha = f(P_{PV}, S_L) \dots\dots(8)$$

$$\Delta V_{max} = \max_n (|\Delta V_{P,S,n}|) \rightarrow \min. \dots\dots(9)$$

$$\Delta V_{P,S,n} = V_{P,S,n} - V_{S,n} \dots\dots(10)$$

ただし、 P_{PV} 、 Q_{PV} ：発電所の出力 [W]，無効電力 [var] (正值)， S_L ：負荷の皮相電力 [VA]， $V_{P,S,n}$ ：発電所の出力 P ，負荷と既連系 PV の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]， $V_{S,n}$ ：発電所連系前，負荷と既連系 PV の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]

この制御方法は、(9) 式で表される ΔV_{max} を最小とすることを目的としている。運用にあたっては、図 11、図 12 のような、系統条件に対応した出力別・負荷別に、力率 $\cos\theta$ に対応する α ($=\tan\theta$) を求めておく必要がある。

図 6 に制御の概念図を示す。変電所における配電線の皮相電力の情報を発電業者に連携する方法として 2 つの案が考えられる。1 案は通信網を使用して直ちに連携する方法であり (通信方式)、もう 1 案は過去の実績であるロードカーブを定期的に連携する方法である (ロードカーブ方式)。

3.2 各ノードの電圧変動

図 7 に方式 1、方式 2 のもと、図 1 の系統に出力 1,742kW の発電所を連系した場合の電圧変動をシミュレーションにより検討した結果を示す。

方式 1 では (9) 式に示された提案手法を適用し、電圧が最も上昇する箇所の電圧変動と電圧が最も低下する箇所の電圧変動を同程度とし、配電線全域で生じる電圧変動が最小となるよう発電所の力率を設定した。方式 1 において負荷別に電圧変動を比較すると、負荷 0MVA において上昇・低下側とも電圧変動が最大であった。

変電所より 10.8km 離れたノード D_2 において系統の中で電圧が最も上昇し、その値は 51V となった。変電所より 2.2km 離れたノードにおいて系統の中で電圧が最も低下し、その値は 54V となった。

参考として、方式 2 として発電所の連系箇所の電圧変動が最小 (0V) となるよう力率を調整する方法も検討した。この場合、連系箇所より電源側のノード (3.5km) で電圧が大きく低下した (-68V)。

以降では方式 1 を適用して検討を進めることとした。

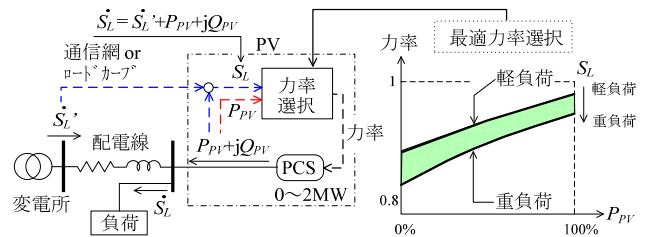


図 6 提案手法の概念図

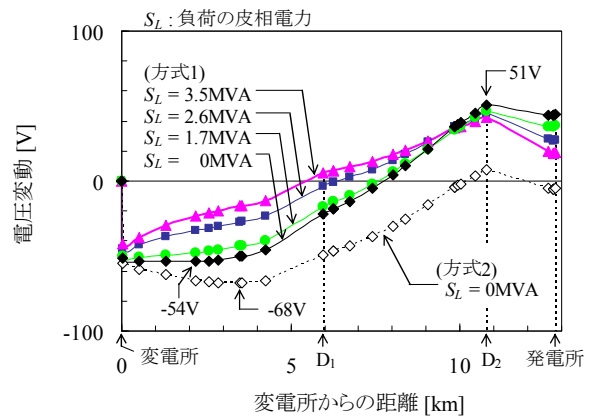


図 7 各ノードにおける電圧変動

4. 実証試験

4.1 試験方法

定格出力 1,742kW の太陽光発電所 (PS) を 6.6kV の配電線に連系し、提案した力率変更制御を実施した時の電圧変動を確認した。試験系統は 2.2 節に示したとおりである。パワーコンディショナ (250kVA×7 台) については、制御ソフトウェア変更を行い、力率変更制御を実施した。電圧値は 3 相平均値を採用した。

4.2 負荷の想定 (通信方式・ロードカーブ方式)

図 8 に定格出力 1,742kW の発電所が解列した時の配電線の有効・無効電力特性を示す。

配電線に連系された発電所を除く既連系 PV の皮相電力は 2 点間の距離 ($|M_1 - M_2|$) から求められる¹⁵⁾。 M_1 は配電線の有効・無効電力の実測点であり、 M_2 は、 M_1 を通り x 軸に対して配電線に接続された PV の力率角 θ_{PV} で延長した直線が負荷動作直線と交わる点である。負荷の有効・無効電力は点 M_2 から得られ、これを真の実績値とみな

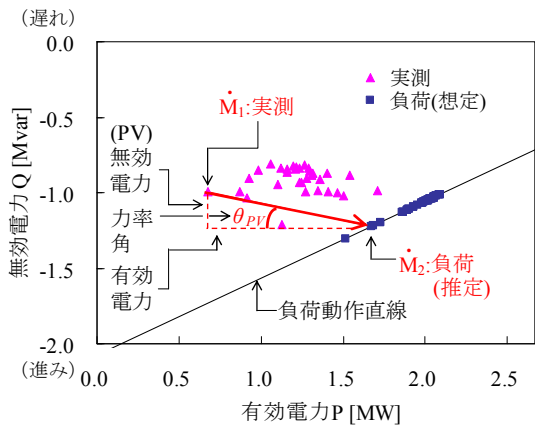


図 8 配電線の有効・無効電力特性

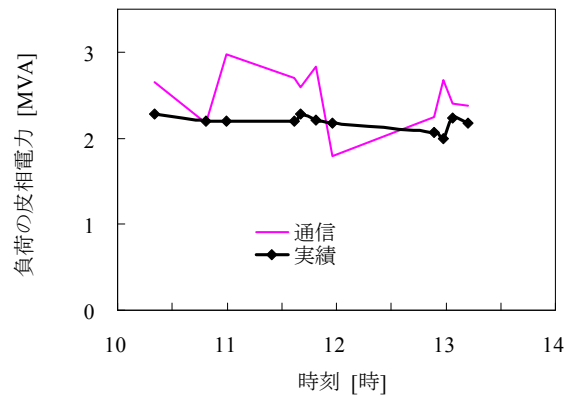


図 9 負荷の皮相電力 (通信方式)

した。

負荷の想定にあたり通信方式およびロードカーブ方式を適用した。通信方式においてはアドホック型無線通信ネットワーク技術を採用した openATOMS¹⁶⁾ を介して変電所における配電線の皮相電力 S_L' の測定値を 10 秒毎に発電所に連携した。配電線に接続された PV の出力割合 k (= 実出力/定格出力) は、発電所の出力割合 k と同一として、配電線上の PV の出力および負荷を求めた。ロードカーブ方式において PV の出力を除いた負荷を想定するため、試験日直近のうち、雨天により配電線の皮相電力 S_L' の日平均値が最大となる日の時系列測定値 (ロードカーブ) を採用した。

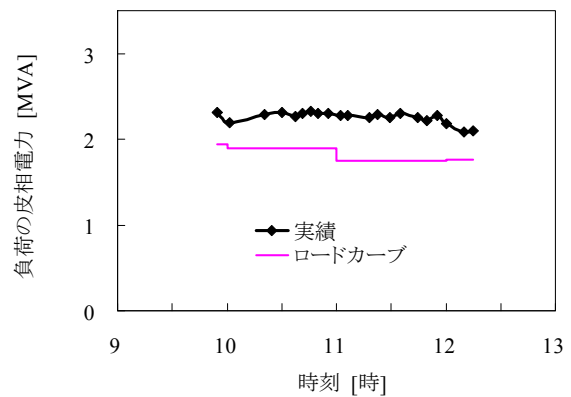


図 10 負荷の皮相電力 (ロードカーブ方式)

図 9, 図 10 において、それぞれ通信方式およびロードカーブ方式により求めた負荷の皮相電力と実測値の関係を示す。電圧変動の確認のため発電所を解列したポイントはそれぞれ 11 点, 21 点となった。通信方式では、想定した負荷の皮相電力は実測値より全般的に大きく見積もられた。その理由として、発電所と配電線に接続された PV 間の定格出力に対する実出力の割合 k の違いの影響が考えられる。ロードカーブ方式では、想定した負荷の皮相電力は実測値より若干低い値となった。

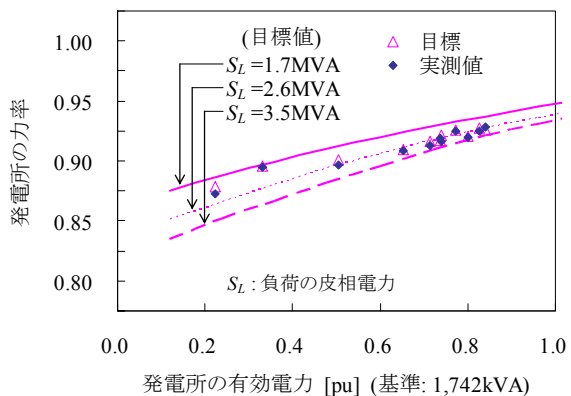


図 11 発電所の有効電力と力率の関係 (通信方式)

4.3 発電所の力率

図 11, 図 12 に通信, ロードカーブ方式の 0.4kV 側における発電所の有効電力と力率の関係を示す。目標の力率値に対し実績値は $\pm 1\%$ の範囲に収まった。

4.4 電圧変動

図 13 に有効電力 0.65pu, 力率 0.92 により力率変更制御 (ロードカーブ方式) で運転中の発電所

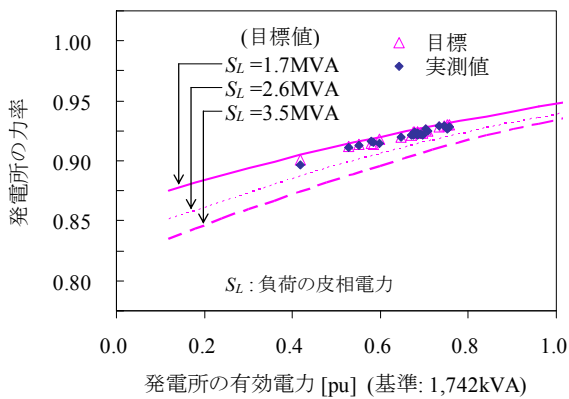


図 12 発電所の有効電力と力率の関係 (ロードカーブ方式)

を配電線から解列したときの配電線各地点の電圧変化を示す。発電所解列時の電圧変化の値は 0V とした。発電所の解列により配電線上の地点 D₂ において最も電圧が低下, 変電所において最も電圧が上昇し, その電圧変動 $\Delta V_{P,S,n}$ はそれぞれ 58V, -19V, 電圧変動幅 $\Delta V_{R,P,S}$ は 77V (6.6kV 系統) となった。ここで電圧変動幅 $\Delta V_{R,P,S}$ を (11), (12) 式で定義する。

$$\Delta V_{R,P,S} = \max_n (\Delta V_{P,S,n}) - \min_n (\Delta V_{P,S,n}) \quad (11)$$

$$\Delta V_{P,S,n} = V_{P,S,n} - V_{S,n} \quad (12)$$

ただし, $V_{P,S,n}$: 発電所の出力 P, 負荷と既連系 PV の皮相電力におけるノード n の電圧 [V], $V_{S,n}$: 発電所連系前, 負荷と既連系 PV の皮相電力 S におけるノード n の電圧 [V]

電圧変動幅 $\Delta V_{R,P,S}$ は発電所の連系に伴い最も電圧が上昇した地点 D₂ の電圧上昇の値と最も電圧が低下した地点 SS (変電所) の電圧低下の値の差を示す。

また, 発電所の有効電力と力率の波形は似通っており, 有効電力の変化に対し, 力率が追従して変化していることがわかった。

図 14 に通信方式における発電所の有効電力と電圧変動の関係を示す (11 点)。負荷の皮相電力の想定は実績値より若干高めであり, 設定した発電所の力率は, 発電所の連系により配電線上の最も電圧変動が高くなる地点 D₂ の電圧上昇値と最も電圧変動が低くなる地点 (変電所) の電圧降下

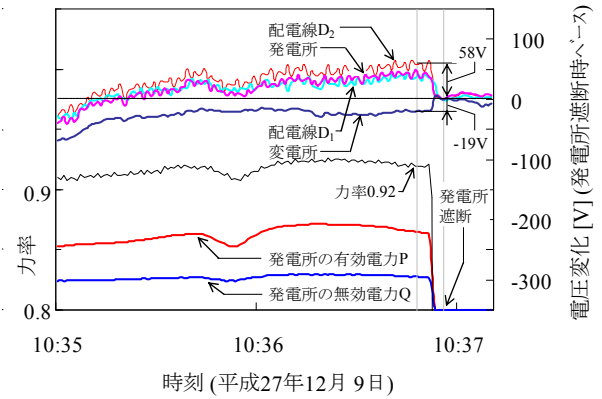


図 13 発電所解列時の電圧変動 (有効電力 0.65pu, 力率 0.92, ロードカーブ方式)

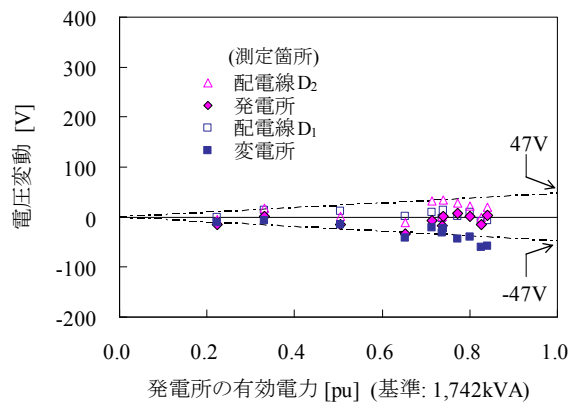


図 14 発電所の有効電力と電圧変動の関係 (通信方式)

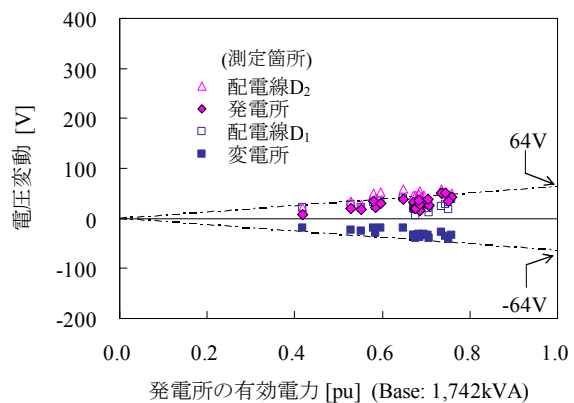


図 15 発電所の有効電力と電圧変動の関係 (ロードカーブ方式)

値を同程度にする理想値より若干低めに設定された。このため, 観察された各地点の電圧変動の

値は全体的に低く推移し、系統末端の発電所については電圧変動が 0V 近くになった。地点 D₂ における電圧上昇値と変電所における電圧低下値が同程度になるよう発電所の力率を若干高めに設定することで、電圧変動の振れ幅の範囲を狭めることができると思われる。

図 15 にロードカーブ方式における発電所の有効電力と電圧変動の関係を示す (21 点)。図 14 のケースとは逆に負荷の皮相電力の想定が実績値より若干低めであり、設定された発電所の力率は理想値より若干高めとなった。このため、各地点の電圧変動の値は全体的に高く推移している。

4.5 電圧変動幅

図 16, 図 17 に通信方式, ロードカーブ方式による力率変更制御のもと, 生じた電圧変動幅 $\Delta V_{R,P,S}$ について実測値と計算値の比較を示す (計 32 点)。

実測された電圧変動幅は 6.6kV 系統において通信方式で最大 94V, ロードカーブ方式で最大 128V となり, 通信方式の値がロードカーブ方式の値より若干小さくなった。実測された電圧変動幅は両方式ともほぼ計算値通り抑制されており, 電圧変動幅の実測値と計算値の差異は両方式合計で平均値 17V, 標準偏差 8V と少なかった。

定格出力時 (1,742kW) に生じる電圧変動幅は数値計算上, 力率 1 では 680V, 力率一定制御では 229V となるが, 提案した力率変更制御の実測値は最大で 128V となり (ロードカーブ方式), 提案手法の適用により従来手法より効果的に電圧変動が抑制されることを確認した。

5. まとめ

本稿では長距離配電線に連系したメガソーラー発電の電圧変動対策として, 出力や配電線負荷に応じて PV の力率を変化させるとともに, 連系箇所間の電圧変動を最小に抑えるのではなく系統全体に生じる電圧変動を最小に抑える新たな無効電力制御 (力率変更制御) を扱った。力率変更制御のもと, PV の連系に伴い生じる電圧変動は PV の出力と負荷の皮相電力, 変電所-連系箇所間の距離に依存する。

実システムを用いた試験により提案した力率変更制御の電圧変動抑制効果を確認した。提案手法の

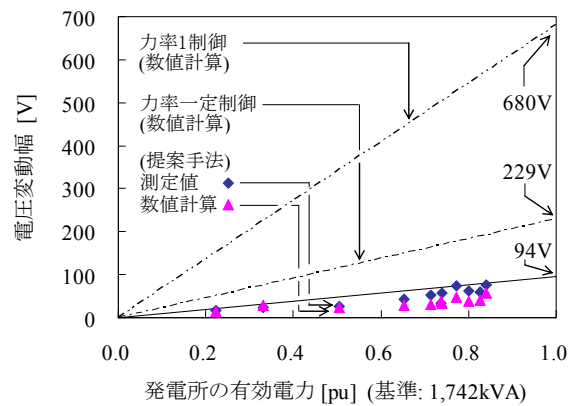


図 16 発電所の有効電力と電圧変動幅の関係 (通信方式)

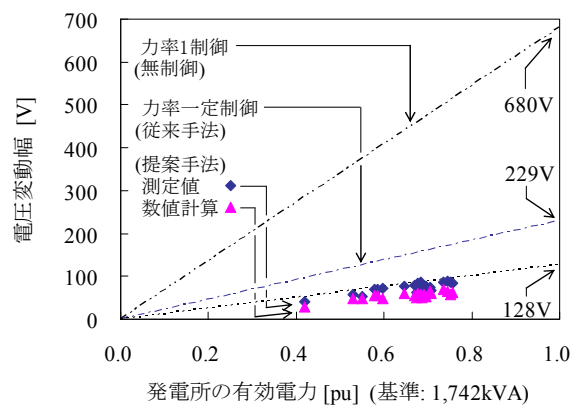


図 17 発電所の有効電力と電圧変動幅の関係 (ロードカーブ方式)

もと亘長 12.8km の配電線末端に出力 1,742kW のメガソーラー発電を連系したところ, 観測された電圧変動幅は 1.9% (128V) となった。これは, 無対策である力率 1 制御のもと生じる電圧変動幅の約 19%に, 従来手法である力率一定制御のもと生じる電圧変動の約 56%に抑制された。

当該手法の適用により電圧変動が効果的に抑制され, 配電線上のメガソーラーの連系可能な領域が従来手法より拡大されたことを確認した。

【参考文献】

- 1) 川口直樹, 棚田一也, 堅田広司, 高崎昌洋: 「風力発電所連系時の連系点力率一定制御による電圧変動対策」, 平成 19 年電気学会全国大会, No.6-058 (2007-3)

- 2) 田中俊輔, 鈴木宏和: 「分散形電源の自律分散制御による電圧補償制御方式の検討」, 電気学会論文誌 B, Vol.129, No.7, pp.869-879 (2009-7)
- 3) 石丸雅章, 田町英樹, 駒見慎太郎: 「電力系統における PV 常時進み定力率運転の効用」, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.7, pp.615-622 (2012-7)
- 4) 細川充海, 石丸雅章: 「メガソーラー連系による配電線電圧上昇の抑制に関する考察」, 平成 24 年電気学会全国大会, No.6-131 (2012-3)
- 5) 横田耕作, 羽田野伸彦: 「堺メガソーラーの系統電圧への影響評価と対策機能の検証」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.189 (2012-9)
- 6) 京極喜一郎, 細川充海: 「メガソーラーの常時進み定力率運転による電圧変動緩和効果」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.160 (2013-8)
- 7) 内山倫行, 宮田博昭, 伊藤智道, 小西博雄: 「大規模太陽光発電システムの無効電力制御による電圧変動抑制」, 電気学会論文誌 B, Vol.130, No.3, pp.297-304 (2010-3)
- 8) P.M.S. Carvalho, P.F. Correia, and L.A.F.M. Ferreira, “Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 766 – 772, May 2008.
- 9) 河野高一郎, 広瀬正嗣, 橋本渉: 「メガソーラー発電システムの力率一定制御による配電系統の電圧変動対策の検討」, 平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.127 (2012-9)
- 10) 河野高一郎, 中西英治, 永野賢朗, 長瀬只雄, 北條昌秀, 大西徳生: 「メガソーラー発電システムの力率一定制御による電圧変動抑制効果の実証」, 平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.250 (2013-8)
- 11) K. Kouno, M. Hirose, W. Hashimoto, T. Nagase, M. Hojo, and T. Ohnishi, “Effectiveness of Constant Power Factor Control of Mega-solar System for Voltage Regulation with Long Distribution Line”, *The 10th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pp. 317- 322, Kitakyushu, Japan, Apr. 2013.
- 12) 河野高一郎, 中西英治, 永野賢朗, 北條昌秀: 「長距離配電線に対応したメガソーラー発電システムの無効電力制御による電圧変動抑制」, 電気学会論文誌 B, Vol.135, No.5, pp. 1-14 (2015-5)
- 13) K. Kouno, T. Sogabe, K. Itou, and M. Hojo: “Study on Reactive Power Control of Large-Scale Photovoltaic System for Voltage Regulation with Long Distribution Line”, *Proceedings of IEEE PowerTech Eindhoven 2015*, Eindhoven, the Netherlands, Jun. 2015.
- 14) 河野高一郎, 曾我部剛, 伊藤勝志, 長瀬只雄, 北條昌秀: 「長距離配電線における大規模太陽光発電の無効電力制御による電圧変動抑制の実証試験」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-16-139, PSE-16-159, pp. 103-108 (2016-9)
- 15) 河野高一郎・曾我部剛・伊藤勝志・北條昌秀: 「配電系統の潮流情報を用いた太陽光発電出力推定の検討」, 平成 28 年電気学会全国大会, No.6-187 (2016-3)
- 16) 中西美一: 「オンデマンドモニタリングシステム技術 (openATOMS) の開発と適用」, 電子情報通信学会誌, Vol.94, No.10, pp.852-854 (2011-10)

架空送電線の鋼心腐食メカニズムに関する研究

四国電力(株) 高知支店電力部送電課 富永 能史
四国電力(株) 電力輸送本部送変電部 重井 政人
(株)四国総合研究所 電力技術部 藤川 真人

キーワード : 架空送電線
電力線
鋼心腐食
硫酸イオン
腐食促進試験

Key Words : OverHead Power Transmission Line
Power Line
Steel Wire Corrosion
Sulfate Ion
Accelerated Corrosion Test

Study on steel wire corrosion mechanism of the overhead power transmission line

Shikoku Electric Power Co., Inc., Kochi Branch Office, Electrical Engineering Dept.

Yoshifumi Tominaga

Shikoku Electric Power Co., Inc., System Operation and Transmission Division, Transmission and Substation Dept.

Masahito Shigei

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technology Dept.

Masato Fujikawa

Abstract

It is considered that the form of corrosion about the power line of the he overhead power transmission line is the aluminum wire corrosion by the sea salt. But in late years, we have conformed another form of corrosion which is the internal corrosion on the steel wire about the power line of the overhead power transmission line passing through the mountainous area.

As a result of having carried out the accelerated corrosion test of the electric wires, we had been able to reproduce a corrosion form that aluminum wire corrosion was small, and steel wire corrosion had a big by coordinating corrosion solution composition (pH, sulfuric acid, sodium sulfate density). From this, it was estimated that the main factor of the steel wire corrosion was atmospheric SO₂.

Then, we measured the SO₂ density to estimate distribution of the atmospheric SO₂ density of the Shikoku area. And we performed a diffusion calculation of the quantity of SO₂ outbreak and made a mean SO₂ density map every 1km mesh of the Shikoku area.

And one more thing, we performed an accelerated corrosion test using three kinds of electric wires (ACSR200mm², 410mm², 680mm²) which vary in size (wire diameter, the number of the aluminum layer) and acquired underlying data about a tendency to electric wire strength drop, the speed.

In the last place, we made electric wire corrosion speed map [ACSR330mm²] for the steel wire corrosion using a multiple regression analysis and enabled an estimate of the remaining lifetime of the power line.

1. はじめに

架空送電線の電力線の腐食要因は、これまでの経年電線の腐食劣化データの分析・評価から、海塩によるアルミ腐食と考えられていた。⁽¹⁾

しかし、近年、硫黄酸化物（以下：SO_x）等の影響と考えられる電線の鋼心腐食事例（亜鉛メッキ消失・赤錆）が新たに確認されている。

このため、電線の鋼心腐食のメカニズムを解明するとともに、鋼心腐食による電線の余寿命推定手法についての研究を行ったため、紹介する。

2. 鋼心腐食の発生メカニズム

2.1 鋼心腐食に影響する環境要素

図1に海塩による電線腐食例を示す。ACSR系電線の腐食要因は主に海塩粒子によるアルミ腐食と考えられていたが、近年、山間部を通過する送電線の撤去電線で鋼心のみ発錆する事例が時折確認されている。図2に電線の鋼心腐食事例を示す。外層のアルミ素線には腐食が少ないが、内層の鋼心が発錆している状態が確認されている。

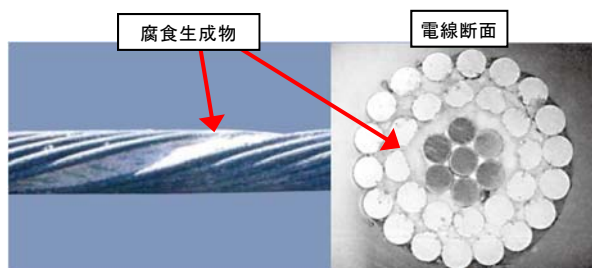


図1 海塩による ACSR の腐食事例⁽¹⁾

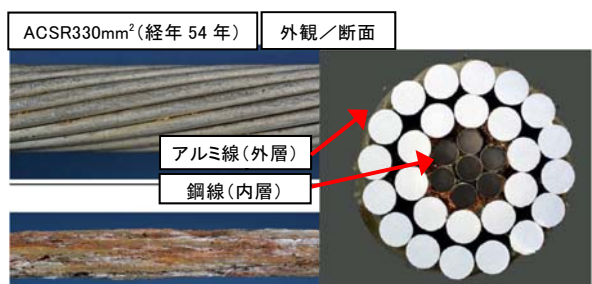


図2 電線の鋼心腐食事例

鋼心腐食電線の付着物を X 線回析分析した結果、塩化物イオンや硝酸イオンに比べて硫酸イオンが多く検出された。

なお、SO_x (SO、SO₂、SO₃) は火山活動等の自然現象によるもののほか、石油・石炭の燃焼、金属の精錬、自動車の走行など、人間の社会的活動に伴って大気中に排出されるが、通常は SO_x のほと

んどすべてを SO₂ とみなしてもよいほど SO、SO₃ の生成は少ない。⁽²⁾ このため本研究では SO₂ を対象とした。

また、鋼材の腐食に関して影響度合いの高いガス種（腐食性物質）を調査した結果、図3の鉄に着目すると、腐食ガスのうち SO₂ の腐食感受性が著しく高いことが分かった。

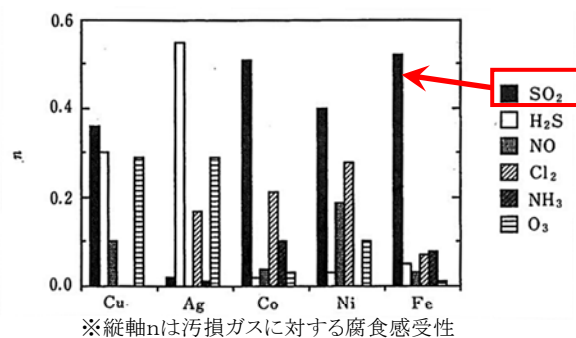


図3 金属材料の腐食に及ぼす汚損ガス種の影響⁽³⁾

以上から、電線の鋼心腐食のメカニズムとして大気中の硫酸イオンが降雨、霧等を媒体として電線内部に取り込まれ、凝縮されたことで鋼心腐食が発生したと推定される。

2.2 腐食促進試験

上記の鋼心腐食メカニズムを再現するために、図4に示す腐食加速試験装置を用いた腐食促進試験を行った。通電加熱した電線試料に腐食性水溶液を間欠的に噴霧する方法（腐食溶液噴霧と通電加熱乾燥を繰り返す方法；乾湿サイクル法）にて実施し、実環境での乾湿、すなわち、降雨や結露による湿潤、水分蒸発による乾燥の繰返しを踏まえた評価手法とした。

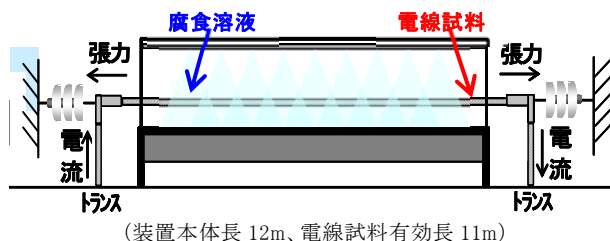


図4 腐食加速試験装置の模式図

腐食溶液組成（pH、硫酸、硫酸ナトリウム濃度）、乾湿サイクル、電線温度をパラメータとして試験を行った結果、図5に示すような実線路での鋼心腐食状態（アルミ腐食が小さく、鋼心腐食が大きい形態）を再現できることが分かった。



図5 腐食促進試験における試料の腐食様相例

3. 腐食因子(SO₂)の調査

3.1 SO₂濃度測定

鋼心腐食の腐食要因となる SO₂ について、四国地域の大气環境中の SO₂ 濃度の分布を推定するために、SO₂ 濃度測定を実施した。測定箇所は観測データが少ない山間部を中心に鉄塔 33 箇所(パッシブ法)、平地部を中心に公的機関 70 箇所(アクティブ法)のデータを取得した。図6に鉄塔での環境データ測定状況を示す。



図6 鉄塔での環境データ観測状況

3.2 SO₂濃度分布推定

上記データをもとに、化学物質の大气中濃度を発生量と気象データ(風向・風速、降水量)から計算する ADMER プログラム⁽⁴⁾(産業技術総合研究所)を用いて拡散計算を実施し、四国内 1km メッシュ毎の平均 SO₂ 濃度の算定と SO₂ 濃度マップを作成した。図7に、四国地域の SO₂ 濃度マップ(2000年ベース)を示す。

なお、近年の SO₂ 排出量は 2000 年頃と大差ないことから、EAGrid_Japan⁽⁵⁾ の 2000 年ベース値を採用した。

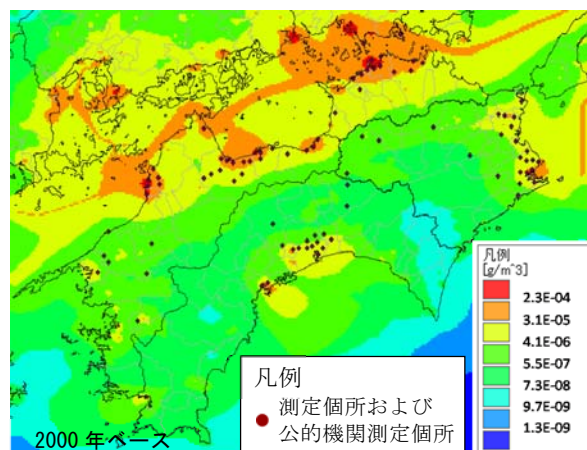


図7 四国地域の SO₂ 濃度マップ(2000年ベース)

4. 鋼心腐食による電線の劣化評価

4.1 腐食促進試験結果

サイズ(素線径、アルミ層数)の異なる3種類の電線(ACSR200mm²、410mm²、680mm²)の腐食促進試験・性能評価試験結果から、電線強度低下傾向・速度に関する基礎的なデータを取得した。

図8に各試料の鋼線の引張強度低下率の変化状況を、図9に各試料の外観状況を示す。

各試料とも腐食試験時間とともに引張強度低下率が次第に大きく低下している。これは、鋼心表面の亜鉛めっきが次第に消失した後、時間経過とともに鋼線(6本層より線)が腐食減肉し、鋼線間に隙間が生じ、腐食溶液に曝される面積が増加したためと推定される。

また、ACSR200、410、680mm² 試料における6本層鋼線の外観様相を比較すると、素線径の細い線種、あるいはアルミ層数の少ない線種では、鋼心腐食劣化が早い傾向が確認され、引張強度につい

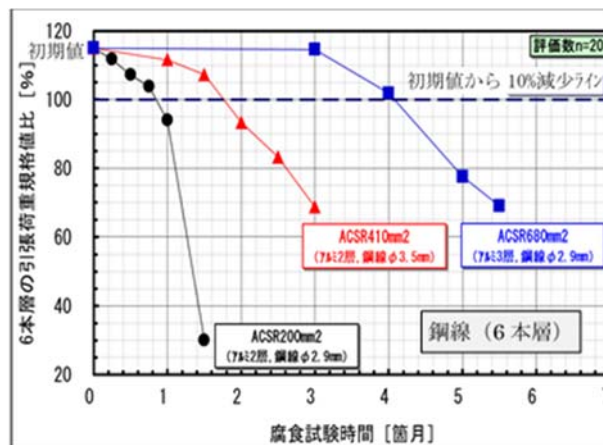


図8 腐食促進試験での鋼線の引張荷重残存率

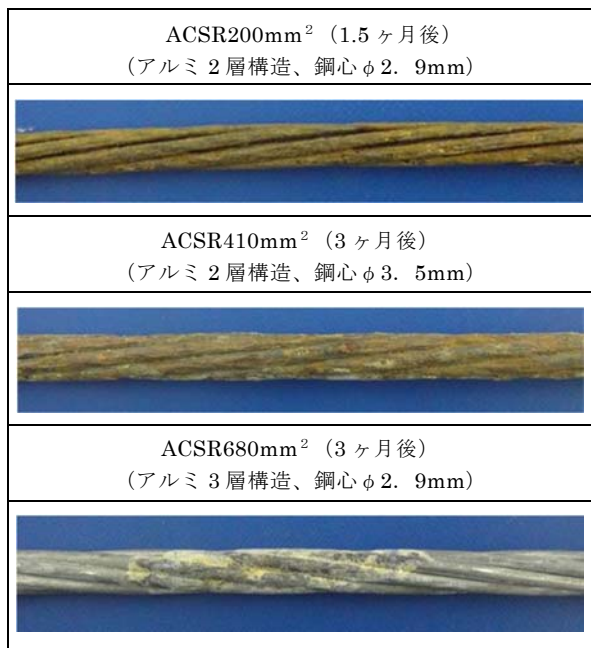


図9 腐食促進試験での各試料の外観様相

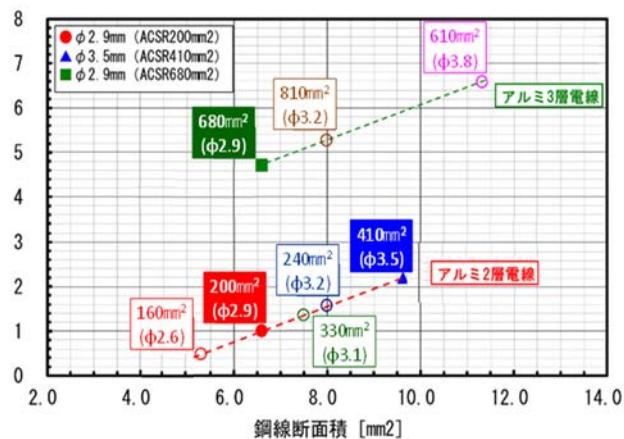
でも、鋼心素線径が小さくなると引張強度の低下は早く、アルミ層数が多いと引張強度の低下は遅いことが確認された。アルミ層数が多いことで、腐食溶液が電線内部まで浸入しにくくなることで腐食の進行が遅くなり、引張強度の低下は遅くなったと考えられる。

4.2 電線の腐食劣化評価

次に、上記で得られた ACSR 200、410、680mm² 試料の寿命時間、鋼線断面積、アルミ層数から、他サイズ電線の腐食劣化速度を推定した。比較のため、200mm² サイズ品を基準とした鋼線の寿命時間比とした。図 10 に、ACSR における 6 本層鋼線の寿命時間比の評価結果を示す。ここで、寿命時間は、引張強度が初期値から 10%減少するまでの腐食試験時間とした。

アルミ 2 層については、ACSR 200、410mm² の試験結果から、鋼素線の断面積比で ACSR 160、240、330mm² を推定した。素線の太サイズ化により腐食欠損の影響が相対的に軽減されるため、相対寿命は長くなっていると考えられる。

また、アルミ 3 層については、アルミ ACSR 200、680mm² の試験結果からアルミ 2 層と 3 層の寿命時間比で求め、素線径の異なる ACSR 610、810mm² はアルミ 2 層での素線径の関係を用いて推定した。アルミ層数の増加によって、鋼心層への溶液浸入



*縦軸は ACSR 200mm² の寿命時間を 1 とした時の相対寿命

図 10 ACSR (6 本層鋼線) の寿命時間比の評価結果

がし難いことで腐食の進行が遅くなるため、相対寿命は長くなっていると考えられる。

5. 電線の余寿命推定手法

電線の余寿命推定を行うために、今回得られた鋼心腐食は大気環境中の SO₂ が影響しているという知見等を考慮し、電線腐食速度マップを作成した。

5.1 重回帰分析

電線腐食速度マップの作成方法は、目的変数を電線強度低下率とし、説明変数に鋼心腐食事例が確認された場所の環境条件を考慮して、SO₂ 濃度、雲中率、年間降水量平均値等を用いて重回帰分析を行った。図 11 に、重回帰分析に使用した主な説明変数を示す。

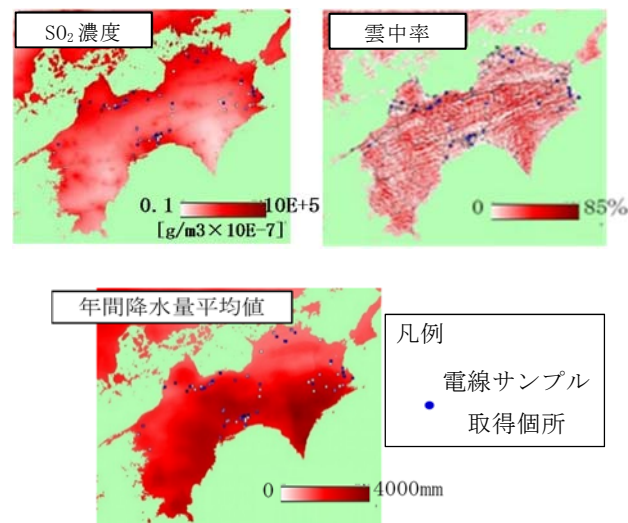


図 11 重回帰分析に使用した主な説明変数

雲中率は、凝結高度が地点の高度より低くなる割合であり、雲中率が高いと電線が水蒸気に曝される割合が多くなり、電線の内部へより SO_2 が浸透しやすくなると考えられる。(気象庁観測データから推定)

年間降水量平均値は、気象庁のデータを使用し、降水量の少ない地点では電線の雨洗効果が少なくなり、腐食しやすくなると考えられる。

5.2 電線腐食速度マップ(SO_2 による鋼心腐食)

重回帰分析の結果、得られた電線腐食速度マップ(SO_2 による鋼心腐食)を図12に示す。山間部でも電線の引張強度低下率が高い地点があり、山間部の鋼心腐食状況が反映されている。

また、作成したマップはACSR330mm²ベースで作成されているため、図10で示した他サイズ電線との寿命時間比較結果を用いて補正が可能である。

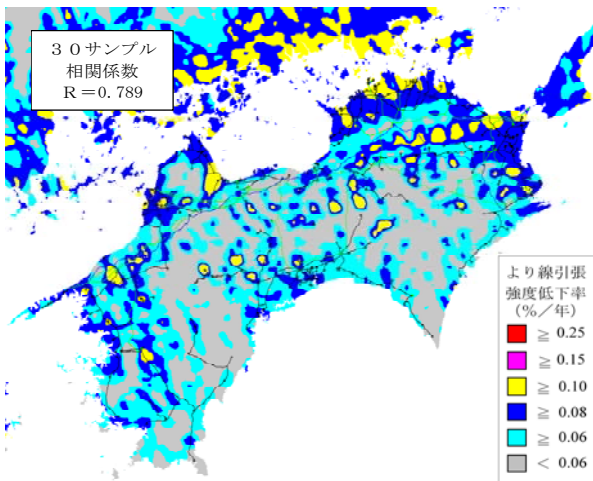


図12 電線腐食速度マップ(SO_2 による鋼心腐食)

6. まとめ

架空送電線の鋼心腐食メカニズムとして、大気環境中の硫酸イオンが雨水等を媒体にして電線内部に侵入し、凝縮されることで鋼心腐食が進行することを想定し、電線の腐食促進試験を行った結果、腐食溶液組成(pH、硫酸、硫酸ナトリウム濃度)、乾湿サイクル、電線温度等を調整することで、実線路での鋼心腐食状態(アルミ腐食が小さく、鋼心腐食が大きい形態)を再現できることが分かった。

また、鋼心腐食の主な要因と考えられる SO_2 濃度について、四国地域の SO_2 濃度分布を推定する

ために、 SO_2 濃度測定および SO_2 発生量データと気象データを用いた拡散計算を行い、四国内 1km メッシュ毎の平均 SO_2 濃度の算定と SO_2 濃度マップを作成した。

電線の余寿命推定手法として、鋼心腐食の要因と考えられる SO_2 濃度、雲中率、年間降水量等を用いて重回帰分析を行い、電線腐食速度マップ(SO_2 による鋼心腐食)[ACSR330mm²]を作成した。電線サイズが異なるものについては、鋼線の寿命時間比を用いて補正することで対応できる。

今後は、鋼心腐食事例のデータ蓄積を行うほか、大気中の二酸化硫黄について中国大陸から長距離輸送される影響を考慮した濃度推定や地形効果を考慮した SO_2 発生源からの拡散シミュレーション手法などを取り入れることで、 SO_2 濃度推定の精度向上および電線の予寿命推定手法の精度向上が期待される。

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)電力輸送本部送変電部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 電気学会：電気学会技術報告 968 号「架空送電線の電線腐食現象」,(2004) 6., P. 7
- 2) 株式会社東京化学同人：化学大辞典,(1989), P. 150
- 3) D. W. Rice, R. J. Cappell, P. B. P. Phipps and P. Peterson : in “Atmospheric Corrosion” ed. W. H. Ailor, Wiley Interscience, (1982) 651.
- 4) 東野 晴行：リスク評価ツールとしての大気拡散モデルの開発(大気環境学会誌 第44巻 第2号, 2009)
- 5) EAGrid2000_Japan：東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース(国立環境研究所)

最後に執筆者、編集ならびに審査にあられた方々のご協力に対して厚くお礼申し上げます。

研究期報 第105号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 松浦芳彦
株式会社四国総合研究所

発行 株式会社四国総合研究所
〒761-0192
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8
TEL (087) 843-8111
E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp