

グリーン基地局における電力制御手法に関する研究

中村, 祐喜

<https://hdl.handle.net/2324/4496076>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

グリーン基地局における電力制御手法 に関する研究



令和 3 年 7 月

九州大学大学院 システム情報科学府

電気電子工学専攻

中村 祐喜

グリーン基地局における 電力制御手法に関する研究

目次

第1章 序論 -----	1
1.1 緒言-----	2
1.2 グリーン基地局-----	3
1.3 グリーン基地局の変形例-----	6
1.3.1 オフグリッド基地局への適用	
1.3.2 燃料電池との連携動作	
1.4 グリーン基地局の応用例-----	8
1.4.1 電力融通	
1.4.2 デマンドレスポンス	
1.5 本研究の目的と概要-----	13
第2章 ソーラーパネル・蓄電池連携の制御法 -----	20
2.1 自家発電率向上に向けた検討-----	21
2.2 パワーシフト制御-----	24
2.2.1 パワーシフト手法	
2.2.2 余剰充電制御	
2.2.3 制御フロー	
2.3 実証試験-----	31
2.3.1 余剰充電手法の試験結果	
2.3.2 パワーシフト手法の試験結果	
2.4 本章のまとめ-----	36

第3章 天気予報連動の制御法	37
3.1 余剰電力の活用と自家発電率向上効果	38
3.2 天気予報連動制御	41
3.2.1 制御概要	
3.2.2 制御アルゴリズム	
3.3 実証試験	48
3.3.1 通常時の制御の試験結果	
3.3.2 停電時の制御の試験結果	
3.4 本章のまとめ	51
第4章 受電電力平準化の制御法	53
4.1 基地局のデマンド値と蓄電池制御	54
4.2 平準化制御法	58
4.2.1 制御理論	
4.2.2 制御アルゴリズム	
4.3 実証試験	62
4.4 本章のまとめ	66
第5章 整流器電圧制御によるピークカット制御法	67
5.1 基地局の電源システム	68
5.2 整流器電圧制御による蓄電池の充放電	69
5.3 蓄電池のピークカット制御	70
5.4 本章のまとめ	74
第6章 結論	75
6.1 総括	76
6.2 今後の展望	78
謝辞	81

第 1 章

序論

1.1 緒言

地球温暖化の原因とされる CO₂をはじめとした温室効果ガスの排出をいかに削減していくかは、重要な社会課題になっており、ICT の発展に伴う電力使用量の増加に対しても省エネルギー化の要求が高まっている[1]。NTT ドコモの場合、消費する電力の約 7 割は、全国の基地局で使用されているため、基地局電力消費による CO₂排出削減のため、既存基地局にソーラーパネルや大容量蓄電池を導入した「グリーン基地局」の整備に注力しており、2019 年度末時点で 262 局の運用を行っている[2]。ソーラーパネルで発電した電力は無線装置の給電に使われるとともに、余剰電力はリチウムイオン電池などに蓄えることで、停電時への対応力も高めている。

グリーン基地局の取り組みの他にも、近年、通信インフラにおける消費エネルギー削減の取り組みが積極的に行われている。例えば、W-CDMA/LTE 両システム対応の光張り出し装置は従来の W-CDMA システム用光張り出し装置と比較して消費電力を約 30%削減している[3]。通信デバイス自体の省エネルギー化以外にも待機時間やトラフィックの制御等で消費電力を下げる取り組みも行われている。例えば、ルータがデータを送受信していない間は、スリープ状態にすることで待機時間を長くし、消費電力を削減できる[4]。エネルギー消費を考慮したルーティング制御や[5]、自然エネルギーの発電量に応じて通信制御を行う研究も行われている[6]。

また、マイクログリッドとは、小規模エリアを対象とし、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーを組み合わせることで電力需要を満たす小規模電力網である[7][8]。基地局は全国に偏在するため、マイクログリッドのような小規模エリアの中にもいくつかの基地局が存在すると考えられる。マイクログリッドの中では、発電量が不安定な再生可能エネルギーを蓄電池で平滑化することも重要となってくる[9]。例えば、既存の電力系統に太陽光発電を大量に連系させると、太陽光発電の余剰電力の系統への逆潮流による電圧上昇やそれに起因した太陽光発電の出力抑制などの問題が懸念されている。太陽光発電の発電量の予測手法は、予測するデータのサンプリング時間や空間分解能、用いる入力やアルゴリズム等により様々な手法が提案されている[10]。また、配電系統のモデル化や[11]、Box-Muller 法[12]を活用した需要家側の負荷量のモデル化の検討も進んでおり

[13]、これらの発電量・負荷量予測情報を活用した蓄電池運用計画の研究も行われている[14]。基地局には蓄電池も備わっているため、上記の運用計画を活用することで発電電力の不安定性の解消や負荷平準化にも貢献できると考えられる。

一方、近年、激甚化する災害への対応強化や電力需給の安定化が求められる中で、無線通信用の電力バックアップ強化や電力需要のピーク削減などの重要性が増している[15]。基地局では、電力系統の停電時に備えてバックアップ用の蓄電池が備わっている。この蓄電池を従来の鉛電池からリチウムイオン電池へ変更することによる強化も考えられている[16][17]。さらに、電力需要のピーク削減については、蓄電池の利用がひとつの有効な手段と考えられる。電力需要の少ないときに蓄電しておき、電力需要が増大した時に蓄電してある電力を放電することで、電力系統への負荷を軽減でき、電力需要のピーク削減につながる。一方、自然エネルギーへのシフトについても検討が進んできている[18]。特に、太陽光発電の導入が最も注目されている。太陽光発電は電力需要の高い日中の時間帯に発電できるため、電力重要のピーク削減にもつながる。

今後は基地局にも積極的に太陽光発電等の自然エネルギー源を導入し、自然エネルギーと蓄電池を有効利用して電力需要のピーク削減や環境負荷低減に貢献できる「グリーン基地局」が必要となってくる[19]。

1.2 グリーン基地局

図 1.1 に NTT ドコモのグリーン基地局のテストベッドの写真、図 1.2 にその装置の回路ブロックを示す。グリーン基地局は、図 1.2 に示すように、バックアップ電源としてサイクル動作のできるリチウムイオン電池を導入し、停電時のバックアップや通常時の充放電をできる構成にしている[20]。充放電回路は充放電用の回路をそれぞれ備えており、瞬停停電の切替回路は、直流バスの電圧低下を検出する回路を備えており、停電時に瞬断なく蓄電池から供給する。さらに、再生可能エネルギーを利用するためにソーラーパネルを直流バスに並列に接続している。太陽光発電変換回路は MPPT(Maximum Power Point Tracking)機能を備えており、最大発電効率で発電させる[21][22]。また、高効率な DC/DC(Direct Current-to-Direct Current)変換を用いており[23]、変換後の出力電圧を整流器やリチウムイオン電池の電圧より高く設定することで、通信装置へ太陽光発電の電

力を優先して供給する。グリーン基地局はこれらリチウムイオン電池とソーラーパネルに加えて、既存の整流器（商用電力）の3つの電源と充放電制御を行う電源制御部（xEMS）を備えることで、自然エネルギーの有効活用や電力需要のピーク時への対応を実現する[24]。グリーン基地局の電源制御部の機能を表 1.1 に示す[25]。

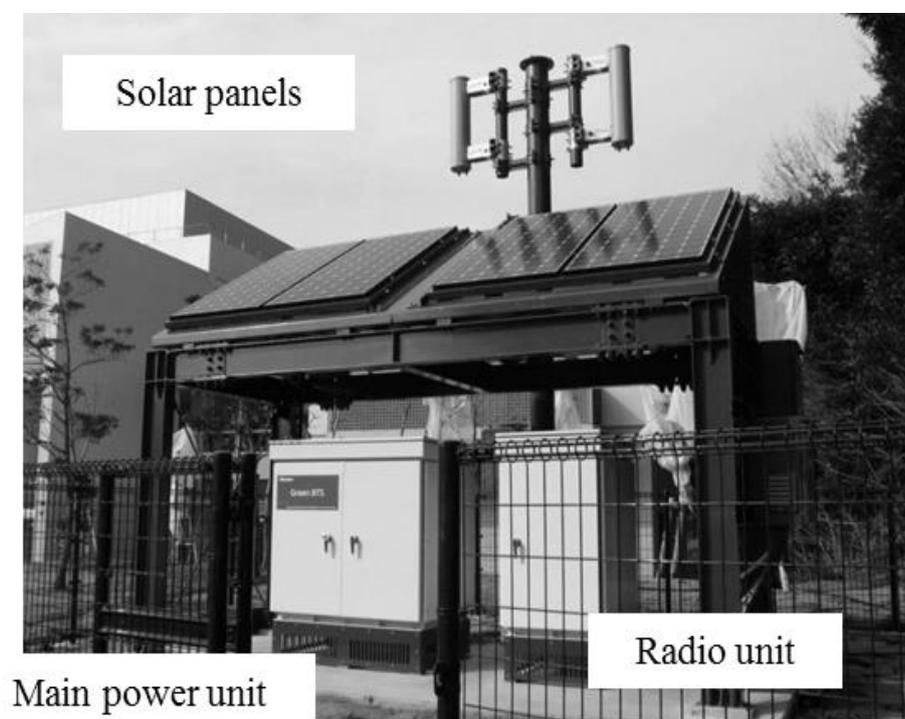


図 1.1 グリーン基地局テストベッド

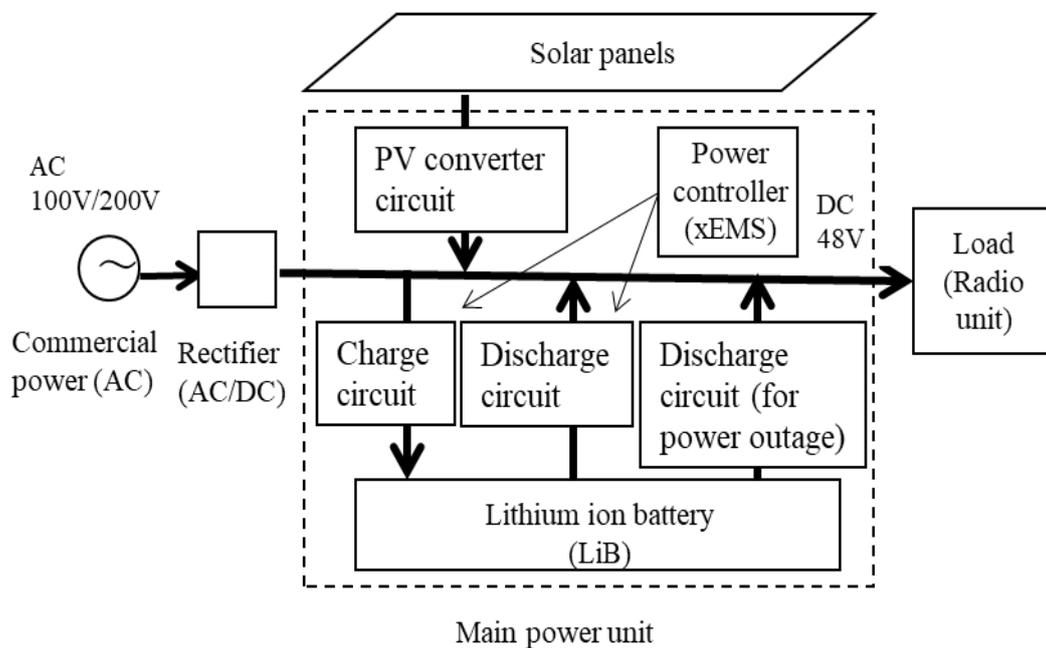


図 1.2 グリーン基地局のブロック図

表 1.1 グリーン基地局の電源制御部の機能概要

Function	Description
Rectifier monitoring	Functional unit that monitors the status of the rectifier (measurement information such as input / output voltage / current and alarm information) and commands the output voltage of the rectifier.
LiB monitoring	Functional unit that monitors the state of the lithium-ion battery (measurement information such as charge / discharge current / voltage and alarm information) and commands the charge / discharge current to the charge / discharge circuit of the lithium-ion battery.
PV monitoring	Functional unit that monitors the status of the PV converter circuit (measurement information such as input / output current / voltage and alarm information) and commands the output voltage of the PV converter circuit.
Smart mater monitoring	Functional unit for collecting B route information of smart meters (Table 1.2).
Connection with server	Functional unit for connecting to a higher-level server and sending and receiving information.

表 1.2 スマートメータの B ルート情報の一例[26]

Information	ECHONET Lite Property code (EPC)	Collectable interval
Operating state	0x80	1 min
Abnormal state	0x88	
Integrated electric energy measurement value (forward direction)	0xE0	
Integrated electric energy measurement value (reverse direction)	0xE3	
Instantaneous electric energy measurement value	0xE7	
Instantaneous electric current measurement value	0xE8	
Regular integrated electric energy measurement value (forward direction)	0xEA	30 min
Regular integrated electric energy measurement value (reverse direction)	0xEB	

1.3 グリーン基地局の変形例

1.3.1 オフグリッド基地局への適用

基地局において、商用電力を利用して運用する受電局が一般的であるが、山間部などで商用電力を受電できないロケーションの基地局では、太陽光発電システムを設置して運用するオフグリッド基地局が以前より存在しており[27]、後者のグリーン基地局化による電力制御の検討が進められている[28]。総務省も 2018 年に開催された ICT インフラ地域展開戦略検討会においてスマート農業や自動運転等の ICT を通じた地域活性化の実現のため、人口の少ない地域を含めて幅広く社会インフラとして整備していくことの必要性を言及している[29]。

図 1.3 にオフグリッド基地局の写真を示す[30]。日射量データに基づく予測誤差を考慮した発電予測手法[31]と、無線機の負荷を上回る余剰の発電電力が発生する直前に蓄電池から同量だけ放電する簡便な制御手法である PDESP(Prior

Discharge Equivalent to Surplus PV power)[32]を用いることで、蓄電池を枯渇させずに太陽光発電のみで運用可能かシミュレーションしている[30]。

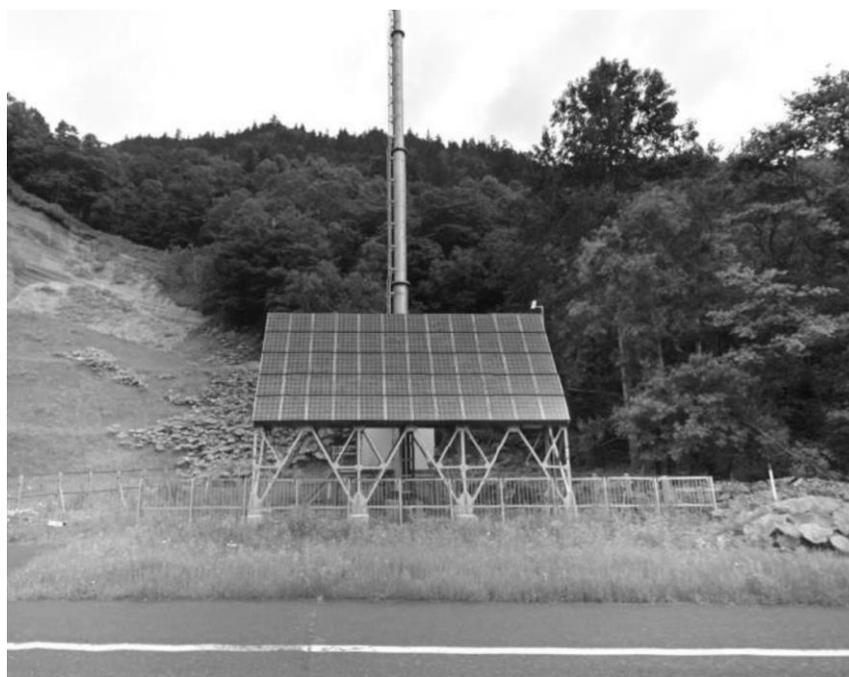


図 1.3 オフグリッド基地局の外観

1.3.2 燃料電池との連携動作

グリーン基地局ではリチウムイオン電池を導入しているが、無線通信に対する需要の急増により無線装置の消費電力が増加している中[33]、更なる長時間バックアップに向けて、燃料電池との連携が研究されている[34]。また、グリーン基地局は全都道府県に設置されているため[35]、燃料電池も豪雪地域などの厳しい環境条件下で動作検証が行われており、グリーン基地局への適用が可能であることが確認されている[36]。図 1.4 に燃料電池との連携基地局の写真を示す。ソーラーパネルの下に 2 つの収容箱が確認でき、それぞれ燃料電池とその燃料が入っている。本燃料電池は、メタノールと空気中の酸素を化学反応させて電気を起こすことで、有害物質も発生しない静寂性に優れた発電機であり、グリーン

基地局との連携運転により、1週間以上の基地局の運営が可能となる[37]。



図 1.4 燃料電池との連携基地局

1.4 グリーン基地局の応用例

本研究テーマであるグリーン基地局の電力制御研究を活用した応用例として、広域に配置されたグリーン基地局含む基地局群を想定した電力連携に関する研究が行われている。

1.4.1 電力融通

複数のグリーン基地局間の電力融通を想定したシミュレーションを行うが、具体的に電力融通とは電力系統への逆潮流電力を他の基地局で受電する仮想的なマイクログリッドを想定している。よって、グリーン基地局が複数同時に稼働しており、かつ商用系統を介して連系している状況を想定している。

図 1.5 に電力融通の制御例を示す。満充電状態などの理由で発生する余剰電力

は、他局の無線機もしくはリチウムイオン電池に融通電力として供給できるものとし、他局にも供給できないときには廃棄電力として扱う。また、融通電力はバックアップ時間の短い局に優先して供給される。気象庁データを活用したシミュレーションの結果、単局で電力制御を行った場合に比べて、複数局で電力を融通することで余剰電力をさらに有効に活用できることが報告されている[38].

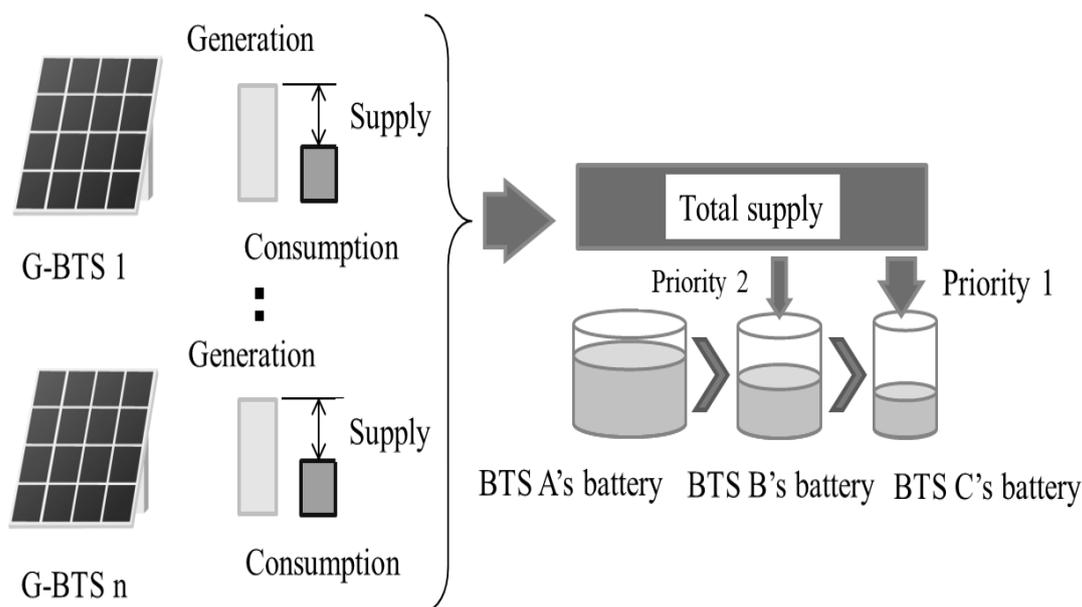


図 1.5 グリーン基地局 (G-BTS) の電力融通の制御例

グリーン基地局を用いた電力融通の実機検証に向けた基礎検討も進められている[39][40]。図 1.6 に双方向マルチポートコンバータを適用したグリーン基地局の概要図を示す。本システムは、様々な定格電圧を持った複数のエネルギー源、蓄電装置、負荷装置を同一のシステム内に接続でき、双方向な電力伝送を可能にする[41][42]。表 1.3 にグリーン基地局を用いた電力融通に求められる動作モード例を示す。表のモード 1 によると、ソーラーパネルの発電電力を無線機に供給しながら、余剰発電分を蓄電池に充電して、蓄電池が満充電状態となると、他局への電力融通に向けて、系統に逆潮流させる動作を確認している[43]。

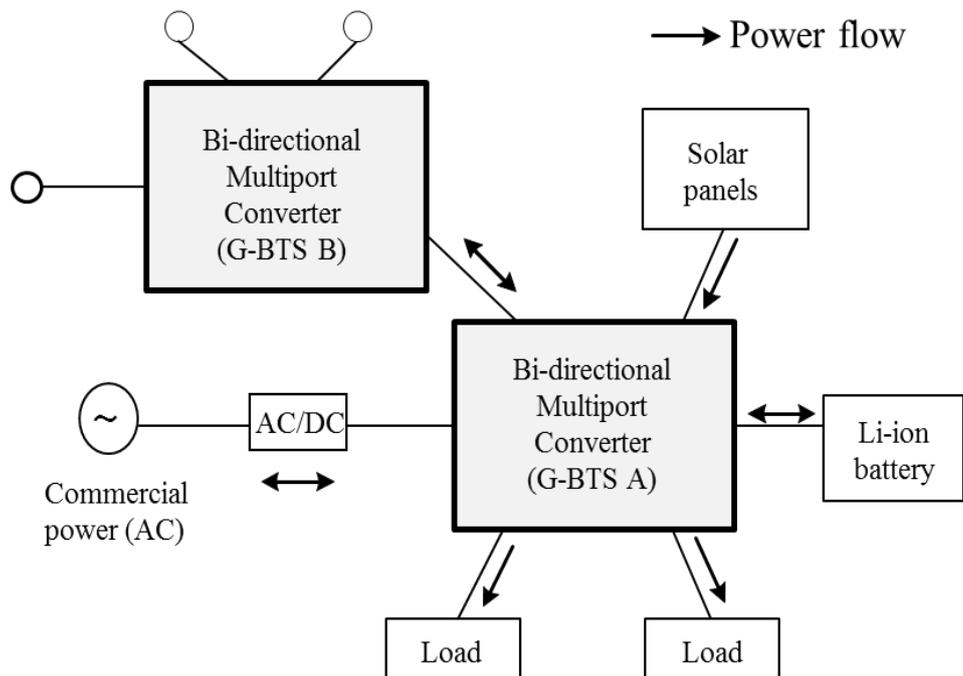


図 1.6 グリーン基地局への双方向マルチポートコンバータの適用

表 1.3 電力融通の動作モード例

Mode	Power flow	Transition condition
1.PV	① (PV +)GRID ⇒ BTS ② PV ⇒ BTS + LIB ③ PV ⇒ BTS + GRID	①→② : GRID=0 ②→① : PV < BTS ②→③ : SOC=100% ③→① : GRID=0
2. Discharge	④ (PV +)GRID + LIB ⇒ BTS ① (PV +)GRID ⇒ BTS	④→① : Low limit SOC
3.Charge	⑤ (PV +) GRID ⇒ BTS + LIB ① (PV +)GRID ⇒ BTS	⑤→① : Pre-directed SOC

1.4.2 デマンドレスポンス

現在、電力取引において、電力の供給状況に応じた需要抑制（DR：デマンドレスポンス）の技術が注目されており、電力需要家が自らの電力消費パターンを変化させ、需要を抑制することでインセンティブ（報奨金）を受け取る仕組みが考えられている[44]。このとき、一つの電力需要家である基地局においても、蓄電池の放電によって需要抑制を行うことが可能であり、これによって新たな利益創出となる可能性がある。

OpenADR は自動デマンドレスポンス技術の国際基準規格であり、送配電事業者（電力事業者）、アグリゲータ及び需要家間で DR 情報メッセージ交換のデータモデルと通信プロトコルを規定している[45]。具体的には、事業者のサーバと需要家との間を XML 形式のメッセージ交換を行うことで DR 要請と応答を行うこととなっており、特にメッセージの送信元を VTN（Virtual Top Node）、その受信先である VEN（Virtual End Node）と呼び、通信モデル化されている。また DR イベントを作成し、アグリゲータや需要家へ発行するためのサーバは DRAS（Demand Response Application Server）とされ、需要家は通常この DR イベントを各種 EMS（xEMS）を介して受信する。

図 1.7 にグリーン基地局における DR シーケンス例を示す。まず送配電事業者より DR 発動の予告（DR 開始日時、DR 継続時間、抑制容量など）がアグリゲータへ送信され、次にアグリゲータが抑制容量に応じて需要家を選択し、DR 要請を行う。基地局が xEMS を介して DR 要請を受けた場合は、蓄電池の放電が行われる（ネガワット）。蓄電池の放電による抑制容量 xEMS を介してアグリゲータへ通知され、アグリゲータはこれらを収集し、送配電事業者へ報告を行う。以上が OpenADR2.0b の適用範囲の通信の流れとなっており、インセンティブの支払いはその対象外であり、事業者間の取り決めにより支払われる。

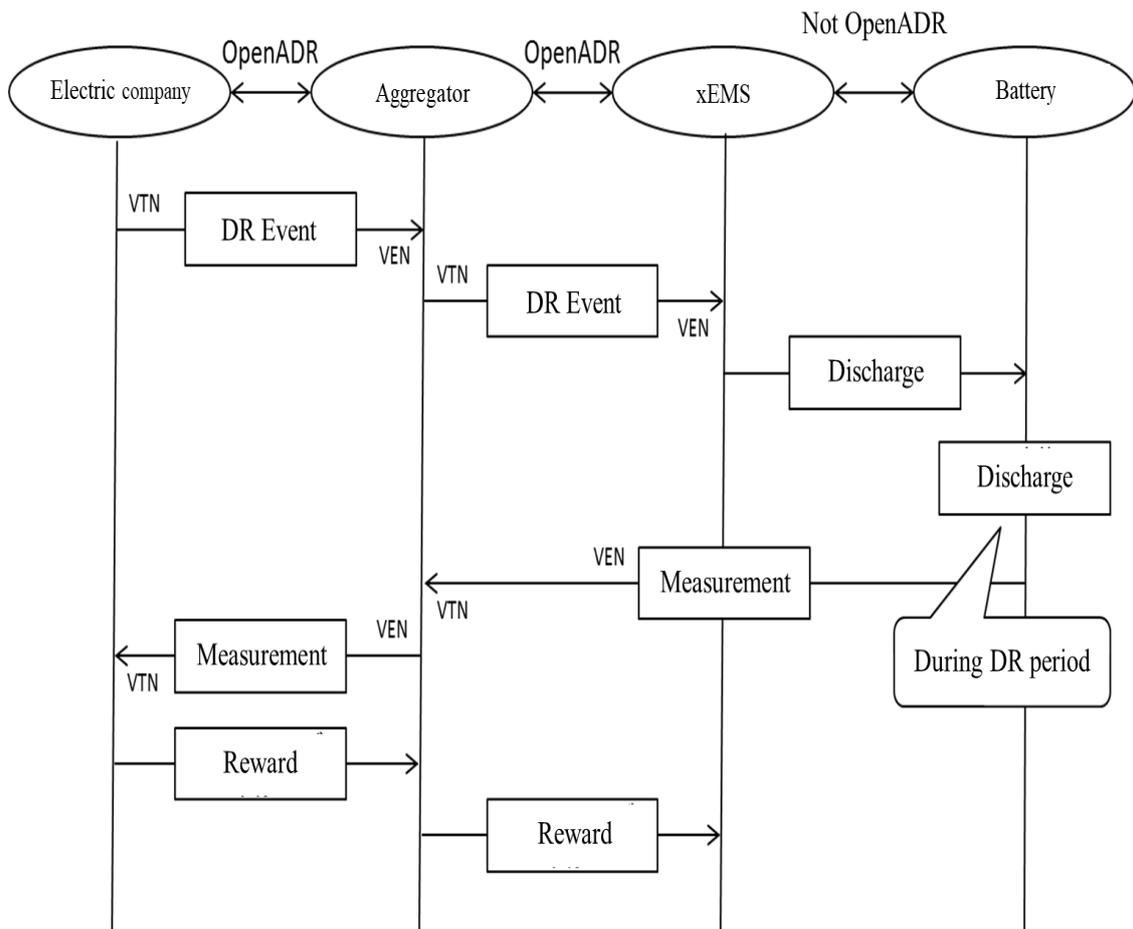


図 1.7 グリーン基地局における DR シーケンス例

図 1.8 にグリーン基地局群を活用した DR 制御の概要図を示す。DR 要請を達成するために各局をアグリゲートすることで対応している。DR により要請された抑制容量を最適に達成するために、各局の節電計画を遺伝的アルゴリズム[46]により策定する手法が研究されている[47]。

一方、グリーン基地局のリチウムイオン電池は、災害対策としての役割も担っているため 調整力として必要な時のみに限定して、運用することが望ましい。具体的には、各電力会社の管内の需要電力予測により、電力需要の逼迫を予測して、予め DR に備えることが検討されている[48]。需要電力予測の検討の一環として、需要電力を特定の条件の過去データを参照して予測する簡易的な手法[49]や数式モデルに基づく予測手法[50]、ニューラルネットワークによる予測手

法[51]などを用いて、通常時の需要電力統計分布をもとに電力需要の逼迫を判断する異常度検出する手法が研究されている[52]。

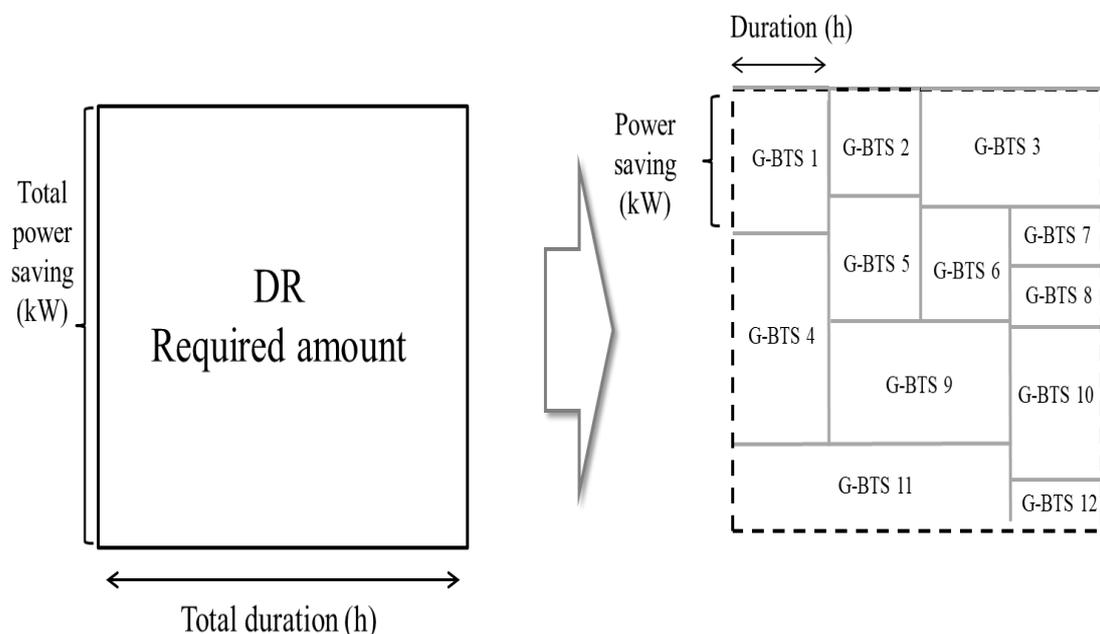


図 1.8 グリーン基地局群を活用した DR 制御の概要図

1.5 本研究の目的と概要

グリーン基地局の電力制御研究において、目標は大きく3つあり、「環境貢献」、「災害対策」、「省エネルギー」である。初めに「環境貢献」について、再生可能エネルギーの積極的な利用により商用電力への依存を軽減して、温室効果ガス削減に貢献する。次に「災害対策」について、停電時の電力制御の高度化により災害時の通信の安定確保に寄与する。最後に「省エネルギー」について、電力需要のピークを削減することで、地域の電力需給の安定化に役立つ。

第2章では、「環境貢献」に向けて、ソーラーパネルの発電電力を無駄なく利用して、自家発電率を高めることができるパワーシフト手法を提案する。その結果、ソーラーパネルの余剰電力の発生を考慮した余剰充電制御による発電電力の活用法を提案し、フィールド実験において自家発電率の向上に有効であるこ

とを明らかにする

第3章では、「環境貢献」と「災害対策」の両立に向けて検討する。第2章で提案した手法では、非常時のバックアップ容量と通常時の充放電容量の比率を固定しているため、天候により発電不足や発電余剰状態が発生することが課題であった。さらに、災害対策の観点から、停電など非常時の電源確保のためなるべくSOC(State of Charge)(%)を高く保つ方が望ましい。一方、余剰電力を損失することなく蓄電するためには、あらかじめSOCを十分低く保つことが必要となり、そのため環境貢献と災害対策が両立できない課題があった。これを解決するため、天気予報に連動した蓄電池の充放電制御に関する最適化手法を提案する。その中で、ソーラーパネルの発電予測に基づくリチウムイオン電池制御を提案し、検証した結果について述べる。

第4章では、「省エネルギー」に向けて、電力需要のピーク削減に貢献する受電電力の平準化制御法を提案する。本制御法ではスマートメータの瞬時電力値を活用して蓄電池のフィードバック制御を行うことで、受電電力の平準化をめざしており、フィールド実験において有効性を明らかにする。

第5章では、グリーン基地局の導入拡大に向けて、整流器の出力電圧の制御による電力制御手法を提案する。提案手法およびシステムにより、蓄電池のピークカット制御が可能であることを示し、複雑な制御装置を必要とせず既存の設備を有効利用して、安価にシステムを構築できることを示す。

第6章では、本研究の総括と今後の展望について述べる。今後の展望では、更なる「環境貢献」、「災害対策」、「省エネルギー」の達成に向けて、グリーン基地局群の電力融通に関する研究動向や、グリーン基地局を活用したデマンドレスポンスの研究動向について述べる。

参考文献

- [1] NTT 持株会社ニュースリリース, “国際イニシアティブ「EP100」、 「EV100」への加盟について, ”日本電信電話株式会社,
<https://www.ntt.co.jp/news2018/1810/181029a.html>, Oct.2018.
- [2] NTT ドコモグループ サステナビリティレポート 2020 :
https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/csr/about/pdf/csr2020w_all.pdf

- [3] 島津義嗣, 大矢根秀彦, 渡辺貴之, 矢島辰朗, 諏訪真悟, “W-CDMA システムと共用可能な LTE システム用無線基地局装置の開発,” *NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル*, vol.19, no.1, pp20-25, Apr. 2011.
- [4] S.Nedevschi, L.Popa, G.Iannaccone, S.Ratnasamy, and D.Wetherall, “Reducing network energy consumption via sleeping and rate-adaptation,” *Proc. 5th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI’08)*, pp.323-326, Apr. 2008.
- [5] L.Lin, N.B.Shroff, and R.Srikant, “Asymptotically optimal power-aware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.15, no.5, pp.1021-1034, Oct. 2007
- [6] J.Baliga, R.W.A.Ayre, K.Hinton, and R.S. Tucker, “Green cloud computing: Balancing energy in processing, storage, and transport,” *Proc. IEEE*, vol.99, no.1, pp.149-167, 2011.
- [7] H.Morais, P.Kadar, P.Faria, Z.A.Vale, and H.M.Khodr, “Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming,” *Renewable Energy*, vol.35, no.1, pp.151-156, Jan. 2010.
- [8] J.Driesen and F.Katiraei, “Design for distributed energy resources,” *IEEE Power Energy Magazine*, pp.30-40, Jun. 2008.
- [9] P.K. Lee, L.L. Lai, S.W. Chan, “A practical approach of energy efficiency management reporting systems in micro-grid,” *Proc. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES’11)*, pp. 24–28, Jul. 2011.
- [10] 大関崇, 島陰豊成, 桶真一郎, 河本薫, 小林智尚, 前島聡, 舟橋俊久, 若尾真治, “太陽光発電システムの発電予測に関する技術動向,” *電気学会 新エネルギー・環境 メタボリズム社会・環境システム 合同研究会資料*, FTE-11-41/MES-12-12, pp.23-29, Nov. 2012.
- [11] 佐藤勝則・若尾真治, “太陽光発電における蓄電システムの運用最適化情報の抽出手法,” *電気学会論文誌 B*, vol. 130, no. 3, pp. 313-319, Mar. 2010.
- [12] G. E. P. Box and M. E. Muller, “A note on the generation of random normal deviates,” *Annals Math. Stat.*, vol. 29, no. 2, pp. 610-611, 1958
- [13] S. Kinoshita, T. Shimoo, S. Wakao, and Y. Miyamoto, “Multi-objective optimization of storage battery operation in clustered residential grid-connected PV,” *Proc. 17th*

Power System Computation Conf. (PSCC'11), pp. 1029-1035, Aug. 2011.

- [14] 林尚芳, 下尾高廣, 若尾真治, “蓄電池併設型太陽光発電システムの運用設計における発電量・負荷量の予測誤差の影響評価,” *電気学会論文誌 B*, vol. 131, no. 11, pp.903-909, Nov. 2013.
- [15] 大規模災害等緊急事態における通信確保の在り方に関する検討会, “大規模災害等緊急事態における通信確保の在り方について,” 総務省, http://www.soumu.go.jp/main_content/000141084.pdf, Dec.27,2011.
- [16] I.Suzuki, T.Shizuki, and K.Nishiyama, “High power and long life lithium-ion battery for backup power sources,” *Proc. 2003 International Telecommunications Energy Conference (INTELEC '03)*, pp.317-322, Oct. 2003.
- [17] 松島敏雄, “通信用大容量リチウムイオン電池と直流給電システムの特徴,” *電子情報通信学会論文誌 B*, vol.J91-B, no.12, pp.1725-1734, Dec. 2008.
- [18] J. Carr, J.C. Balda, and A. Mantooth, “A high frequency link multiport converter utility interface for renewable energy resources with integrated energy storage,” *Proc. 2010 IEEE Energy Conversion Congress & Expo (ECCE'10)*, pp.3541–3548, Sep. 2010.
- [19] 竹野和彦, “グリーン基地局の展開,” *電気設備学会誌*, vol.34, no.2, pp.110-113, Sep. 2014.
- [20] 小宮一公, 関禎徳, 竹野和彦, “環境にやさしく災害に強いグリーン基地局用試験システムの開発,” *NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル*, vol.21, no.1, pp.34-39, Apr. 2013.
- [21] G.J. Yu, Y.S. Jung, J.Y. Choi, and G.S. Kim, “A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms,” *Proc. Solar Energy*, vol.76, no.4, pp.455-463, Apr. 2004.
- [22] T. Tafticht, K. Agbossou, M.L. Doumbia, and A. Cheriti, “An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems,” *Proc. Renewable Energy*, vol.33, no.7, pp.1508-1516, Apr. 2008.
- [23] A. Pratt, P. Kumar, T.V. Aldridge, “Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency,” *Proc. 2007 International Telecommunications Energy Conference (INTELEC '07)*, pp.32-39, Sep. 2007.
- [24] K. Nukada, T. Tamura, and M. Takahata, “Energy Control Optimization of Green

Base Stations to Reduce Disaster Risk and Energy Cost with PV Power Production Forecasts,” *Proc. The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6)*, 8WePo.8.25, Nov. 2014.

- [25] 小宮一公, 古谷崇, 中村祐喜, 村友里恵, 田村隆幸, “環境にやさしく災害に強いグリーン基地局の最適装置設計法と全国監視手法の確立,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, vol.23, no.3, pp.29-35, Oct. 2015.
- [26] JSCA スマートハウス・ビル標準・事業促進検討会“HEMS-スマートメーター-B ルート(低圧電力メーター)運用ガイドライン[第 4.0 版],”経済産業省, https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoujo/smart_house/pdf/009_s03_00.pdf, May.15,2013.
- [27] 小宮一公, 中村祐喜, 村友里恵, 蓑輪浩伸, 竹野和彦, “災害対応型グリーン基地局の最適装置設計法とその発電特性,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.115, no.462, EE2015-33, pp.19-23, Feb.2016.
- [28] 村友里恵, 蓑輪浩伸, 森広芳文, 竹野和彦, “小型無線基地局での自立型電源供給の一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.117, no.157, EE2017-22, pp.75-78, Jul.2017.
- [29] ICT インフラ地域展開戦略検討会, “最終とりまとめ概要,”総務省, https://www.soumu.go.jp/main_content/000569744.pdf, Aug.2018.
- [30] 角谷昌恭, 細川裕士, 竹野和彦, “自立運転型無線通信基地局の機器構成最適化に向けた一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.119, no.309, EE2019-47, pp.63-64, Nov.2019.
- [31] T. Yamazaki, Y. Hara, S. Wakao, Y.Fujimoto, Y.Hayashi, K.Nukada, T.Tamura, M.Takahata, “Application of PV output prediction interval to battery operation of green base stations,” *Proc. The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6)*, pp.1237-1238, Nov.2014.
- [32] Y. Hara, T. Yamazaki, S. Wakao, K.Nukada, T.Tamura, M.Takahata, “Robust battery operation of green base stations considering forecast of PV output,” *Proc.The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion(WCPEC-6)*, pp.1233-1234, Nov.2014.
- [33] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad and M. Latva-aho, “Opportunistic Sleep Mode Strategi-es in Wireless Small Cell Networks,” *Proc.*

2014 IEEE International Conference on Communications (ICC'14), pp.2707-2712, Jun.2014.

- [34] 古谷崇, 小宮一公, 竹野和彦, “グリーン基地局用燃料電池を用いた直流給電システムの検証,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.115, no.60, EE2015-5, pp.25-29, May.2015.
- [35] NTT ドコモ報道発表資料, “天気予報に基づくグリーン基地局の電力制御に成功 - さらに全都道府県へグリーン基地局の設置を完了-, ”https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2016/03/28_00.html, Mar.2016.
- [36] 白戸陽一郎, 蓑輪浩伸, 竹野和彦, “グリーン基地局用燃料電池システムの低温動作特性に関する一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.116, no.133, EE2016-8, pp.19-24, Jul.2016.
- [37] NTT ドコモ報道発表資料, “フジクラとドコモ、小型で長時間発電が可能な新型燃料電池を実用化へ-グリーン基地局への運用に向けた共同実験を開始-, ”https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2017/12/20_01.html, Dec.2017.
- [38] 中村祐喜, 木村和明, 竹野和彦, “グリーン基地局群における局間電力連携制御の一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.117, no.53, EE2017-8, pp.75-79, May.2017.
- [39] M. Nakamura, K. Takeno, R. Hisamitsu and M. Shoyama, “Bi-directional multiport converter for utilizing green base stations as virtual power plant”, *Proc. 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA'19)*, pp.137-141, Nov. 2019.
- [40] S. Sakamoto, M. Shoyama, “Configuration and control method of bi-directional multiport converter for DC power supply system,” *Proc. 2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC'18)*, DOI: 10.1109/INTLEC.2018.8612428, Jan.2019.
- [41] T.Takahashi, M.Miyamoto, G. M. Dousoky, and M.Shoyama, “Droop control for bi-directional DC-DC converters used in multi-level virtual conductors,” *Proc. 2015 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC'15)*, pp.600-605, Oct.2015.
- [42] H.A. Ramadan, Y. Imamura, K. Kawachi, S. Yang, M. Shoyama, “Multi-level virtual conductor using bidirectional DC-DC converters,” *Proc. 2013*

IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC'13), pp.105-109, Oct.2013.

- [43] 久光椋大, 庄山正仁, 中村祐喜, 竹野和彦, “グリーン基地局に適したマルチポートコンバータの制御手法”電気・情報関係学会九州支部連合大会, 07-1A-07, Sep.2020.
- [44] 電力・ガス基本政策小委員会, “ディマンドリスポンスについて,” 経済産業省,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/004_s01_00.pdf, Apr.2017.
- [45] 田路龍太郎, “OpenADR の標準化動向,”NTT 技術ジャーナル, vol.25, no.10, pp.38-41, Oct. 2013.
- [46] 佐藤浩, 小野功, 小林重信, “遺伝的アルゴリズムにおける世代交代モデルの提案と評価,”人工知能学会誌, vol.12, no.5, pp.734-744, Sep.1997.
- [47] 白戸陽一郎, 小宮一公, 竹野和彦, “広域に配置したグリーン基地局群を用いた電力需要削減制御の一考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.117, no.424, EE2017-69, pp.157-158, Jan.2018.
- [48] 宮緒ディフェイ, 寺田雅之, 中村祐喜, 竹野和彦, “グリーン基地局の電力需給最適化のための、広域需要電力予測手法に関する評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.119, no.309, EE2019-45, pp.53-55, Nov.2019.
- [49] 森田圭, 真鍋勇介, 加藤丈佳, 舟橋俊久, 鈴置保雄, “複数の簡易的なデータ参照方法の組み合わせによる翌日電力需要予測の検討,” エネルギー・資源学会論文誌, vol. 38, No.3, pp.1-10, May. 2017.
- [50] 蜷川忠三, “需要家電力の統計予測数式モデルとスマートグリッド ADR 制御,”電気設備学会誌, vol.32, no.8, pp561-564, 2012.
- [51] 飯坂達也, 松井哲郎, 福山良和, “構造化ニューラルネットワークの新しい学習法と最大電力需要予測への適用,”電気学会論文誌 B, vol.124, no.3, pp347-354, 2004.
- [52] V. Chandola, A. Banerjee, and V. Kumar, “Anomaly detection: A Survey,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol.41, No.3, pp.1-58, Jul.2009.

第 2 章

ソーラーパネル・蓄電池連携の 制御法

2.1 自家発電率向上に向けた検討

グリーン基地局の効果を示す有効な指標として自家発電率 F を定義する。自家発電率とはある期間中の通信装置の消費電力量 b に占める発電量 a の活用割合とし以下の式(2.1)で定義する。

$$F = \frac{a}{b} \quad (2.1)$$

この自家発電率 F 向上に向けた検討のため、図 1.2 の構成において、図 2.1 に示すようなソーラーパネルの発電量モデルを考える。ここで、発電量を示すデータは晴天時の太陽高度の時間変化や緯度の関係より正弦波で近似できることを利用する[53]。ソーラーパネルの最大出力電力を A 、日の出時刻を $t=0$ 、日の入り時刻を $t=T$ 、夜間の発電電力を 0 とすると、ソーラーパネルの最大出力電力が負荷電力 Q 以下の場合 ($A \leq Q$)、昼間時刻 t に対するソーラーパネルの発電電力は以下の式(2.2)で表せる。

$$P_1(t) = A \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) \quad (2.2)$$

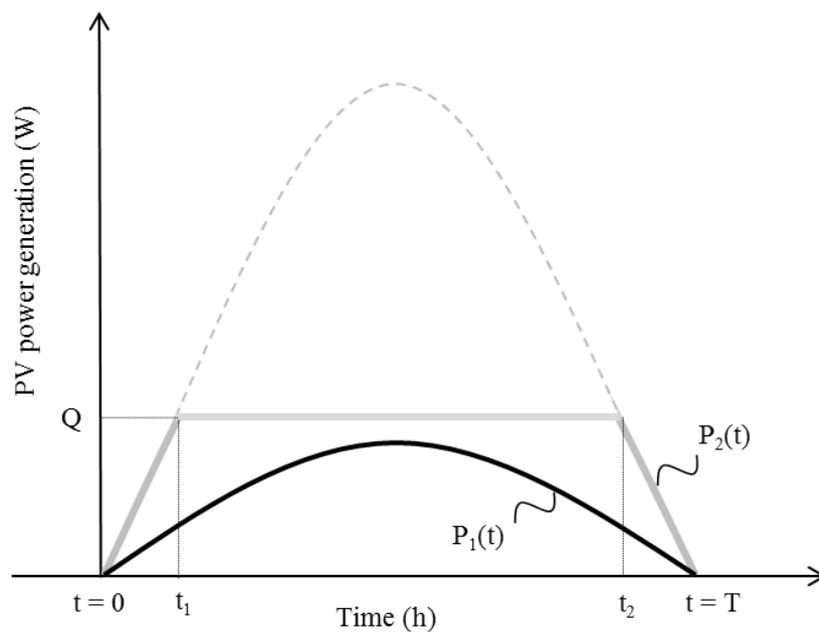


図 2.1 発電量の推定モデル

しかし、ソーラーパネルの最大出力電力が負荷電力 Q より大きい場合 ($A > Q$)、余った発電電力を蓄電池に充電しないとき、有効に利用できる発電電力は以下の式(2.3)となる。

$$P_2(t) = \begin{cases} A \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right), & (0 \leq t < t_1, t_2 < t \leq T) \\ Q, & (t_1 \leq t \leq t_2) \end{cases} \quad (2.3)$$

負荷電力 Q は厳密にはトラフィックに応じて微小量変動するが、およそ一定とみなせる。

今、ソーラーパネルの最大出力電力 A と負荷電力 Q の比を $x (=A/Q)$ とおき場合分けして、有効に利用できる発電量 $P(x)$ を計算する。

ソーラーパネルの最大出力電力が負荷電力 Q 以下の場合 ($x \leq 1$)、発電量 $P(x)$ は式(2.2)を用いて以下の式(2.4)で表せる。

$$P(x) = \int_0^T P_1(t) dt = \frac{2TQ}{\pi} x \quad (2.4)$$

一方、ソーラーパネルの最大出力電力が負荷電力 Q より大きい場合 ($x > 1$)、発電量 $P(x)$ は式(2.3)を用いて以下の式(2.5)で表せる。

$$\begin{aligned} P(x) = \int_0^T P_2(t) dt &= 2 \left[\int_0^{t_1} A \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) dt + \int_{t_1}^{T/2} Q dt \right] \\ &= \frac{2TQ}{\pi} \left\{ x - \sqrt{x^2 - 1} - \sin^{-1}\left(\frac{1}{x}\right) + \frac{\pi}{2} \right\} \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで式(2.5)の計算には、 $t_1 = (T/\pi)\sin^{-1}(Q/A)$ 、 $t_2 = T - (T/\pi)\sin^{-1}(Q/A)$ であることを用いた。

式(2.4)、(2.5)から、ソーラーパネルの最大出力電力と負荷電力 Q の比 x と発電量 $P(x)$ のグラフを図 2.2 に示す。縦軸は $P(x)$ の最大値 TQ により正規化している。

図 2.2 から、ソーラーパネルの最大出力の増加に伴い発電量 $P(x)$ も単調に増加するが、発電量 $P(x)$ の飽和してくる領域を考えて、80%から 90%の発電量を活用

できる 1.7 倍から 3.2 倍程度のソーラーパネルの設置が現実的である。しかしながら、晴天時などに図 2.1 の点線部に示す余剰電力の大幅な損失も発生しており、大きな課題となっている。

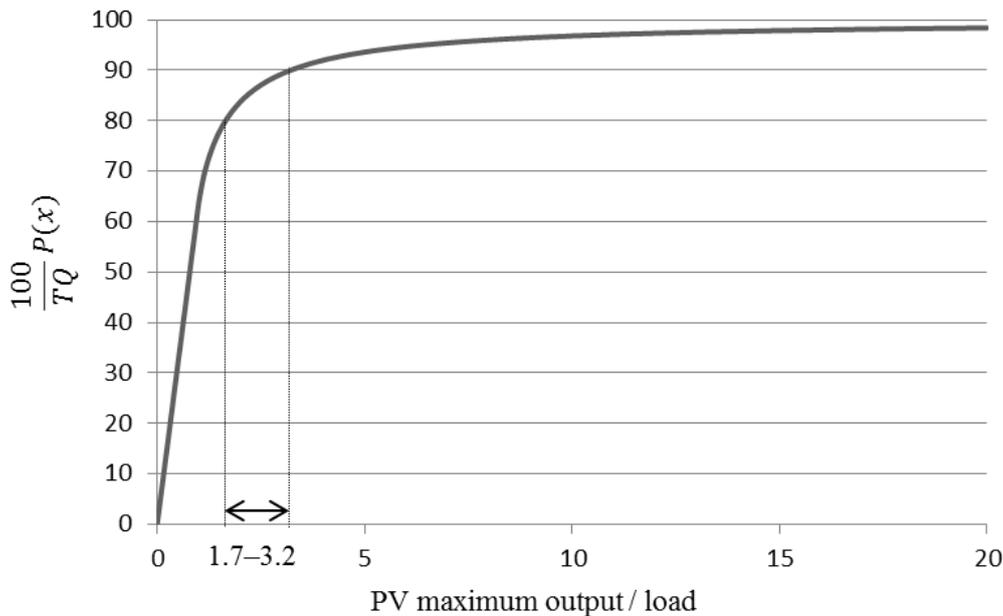


図 2.2 ソーラーパネルの最大出力と発電量の関係

なお、この余剰電力を有効に活用したときの自家発電率を F_1 とすると、このときの 1 日の発電量は式(2.4)と同様にして $2TQx/\pi$ となり、一方、余剰電力を損失したときの自家発電率を F_2 とすると、このときの 1 日の発電量は式(5)の通り求まる。また、余剰電力を活用した場合も損失した場合も負荷電力 Q は一定のため 1 日の消費電力量は等しい。

ここで、自家発電率向上効果を $F'(x) = F_1/F_2$ と定義すると、1 日の自家発電率向上効果は式(2.1)を用いて、式(2.6)のように導かれる。

$$F'(x) = \frac{F_1}{F_2} = \frac{x}{x - \sqrt{x^2 - 1} - \sin^{-1}\left(\frac{1}{x}\right) + \frac{\pi}{2}} \quad (2.6)$$

試験環境を想定して、式(2.6)に $x=2.25$ を代入すると、 $F'(2.25) = 1.67$ と計算され、天候にも依存するが、従来と比較して最大 1.67 倍の自家発電率向上効果が

期待される。次節では、自家発電率の向上に向けてこの従来使われていなかった余剰電力を活用するための蓄電池を用いたパワーシフト手法を提案する。

2.2 パワーシフト制御

直流給電システムであるグリーン基地局に設置しているソーラーパネルに発生する余剰電力を有効に活用するために自家発電率を向上するパワーシフト手法の制御を提案する。

2.2.1 パワーシフト手法

図 2.3 はパワーシフト手法を説明する概要図である。パワーシフト手法は負荷電力以上のソーラーパネルの発電電力の発生を想定して、リチウムイオン電池の SOC を事前に余剰電力を十分に充電ができる値(SOC_0)に設定する。これによりソーラーパネルの余剰電力をリチウムイオン電池に充電し、電力需要の多い時間帯に放電し、夜間に SOC_0 まで充電することで、余剰電力を活用して電力系統への負荷を軽減することが可能となる。

なお、 SOC_0 は余剰電力が発生する晴天のソーラーパネルの最大余剰電力量 S を推定して、リチウムイオン電池の満充電量 FCC から最大余剰電力量 S を引いた値となるように決定され、式(2.2)のように発電電力が近似できるとすると式(2.7)のように示される。

$$\begin{aligned} SOC_0 &= 1 - \frac{S}{FCC} = 1 - \frac{1}{FCC} \int_{t_1}^{t_2} \left\{ A \sin\left(\frac{\pi}{T} t\right) - Q \right\} dt \\ &= 1 - \frac{2}{FCC} \left\{ -\frac{TQ}{2} + \frac{T}{\pi} \sqrt{A^2 - Q^2} + \frac{TQ}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{Q}{A}\right) \right\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

ここで、 A はソーラーパネルの最大出力電力、 Q は負荷電力を示している。実際のパラメータ決定法としては、実際に得られた快晴の日の発電グラフを正弦波でフィッティングし、ソーラーパネルの最大出力電力 A と発電時間 T を求めて、式(2.7)を用いて SOC_0 を決定する。これにより、1日の余剰電力を十分に充電できる余地を蓄電池に残す。

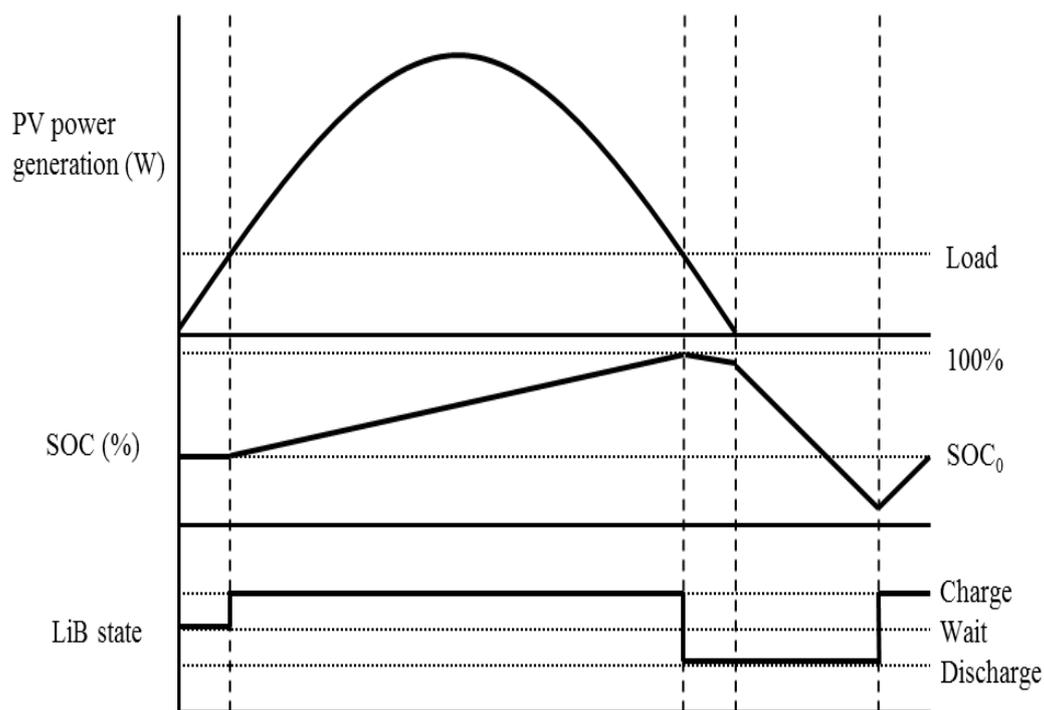


図 2.3 パワーシフト手法の概要

2.2.2 余剰充電制御

前項で 1 日の最大余剰電力量を推定したが、発電電力は短時間で変動するため、実際の余剰電力の発生に応じた余剰電力の充電制御が必要である。

この余剰充電制御には、余剰電力の発生を検知する余剰電力の検出と、余剰電力の損失を最小化するための充電電流の調整が求められる。

図 2.4 は余剰電力の発生状況を示している。同図は余剰電力発生時間における通信装置への供給電圧の変動を測定した実験結果である。ソーラーパネルが、負荷電力と充電電力の和以上に発電するとき整流器から通信装置に電力が供給されないため、直流のバス電圧はソーラーパネルのコンバータの出力電圧となる。この変動を検知することで余剰電力の発生が検出できる。なお、9 時頃に発生しているソーラーパネル出力のピークは試験環境の室温が高く熱交換器が一時的に作動したためであり負荷電力の変動ではない。

次に余剰電力の損失を最小化するための充電電流の調整方法について述べる。

図 2.5 は充電時のリチウムイオン電池への電力供給源を説明している。リチウムイオン電池の充電電流の内、斜線部分は商用電力から充電しており、白色部分はソーラーパネルから充電している。同図より、充電電流が発電電力に対して大きすぎると、不足分を補うために整流器から余分な商用電力を使用することとなり自家発電率の低下を招くこととなる。一方、充電電流が発電電力に対して小さすぎると、ソーラーパネルの発電電力を最大限活かすことができず余剰電力を損失する。以上から発電電力に合わせて充電電流を調整する必要があり、具体的には発電電力と負荷電力の差分を充電することが理想である。

しかしながら、発電電力の推定方法には日射量予測データを用いる方法があるが[54]、実際には部分影の発生など局地的な日射量の変動が有り、正確な推定は難しい。また、負荷電力もトラフィックに応じて若干変動があるため推定することは困難である。

上記の課題を解決するために、山登り法のような局所探索法を用いて充電電流を微量変化させることにより、充電電流を調整する方法を提案する。

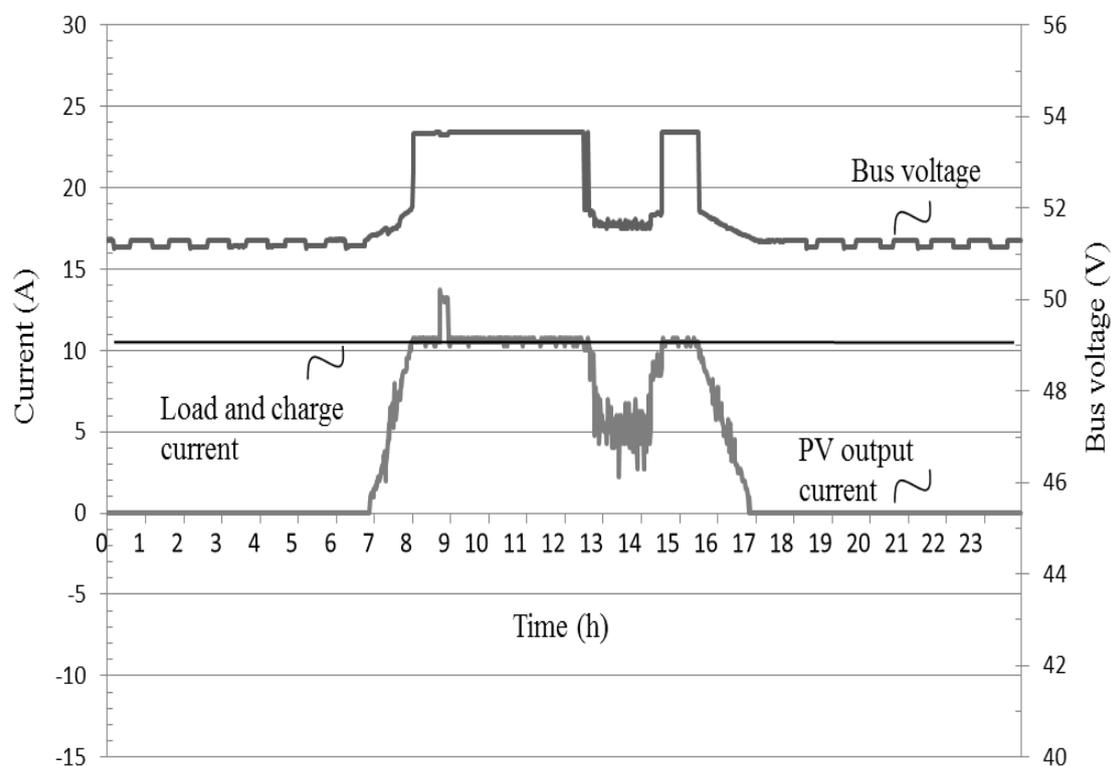


図 2.4 余剰電力発生時間におけるバス電圧の変動

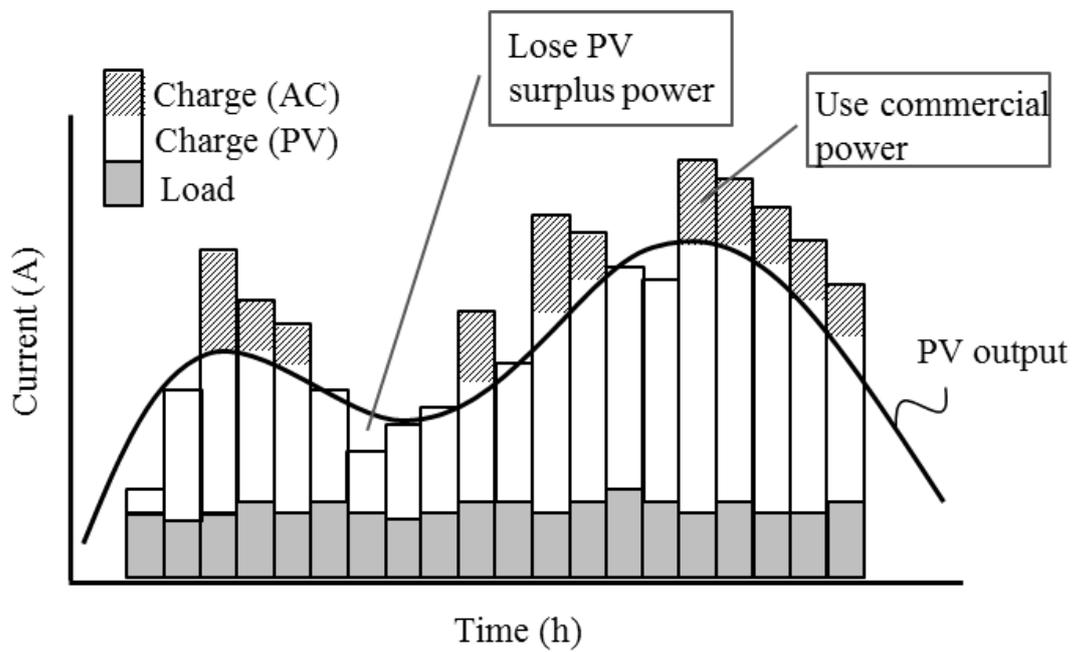


図 2.5 充電時のリチウムイオン電池への電力供給源

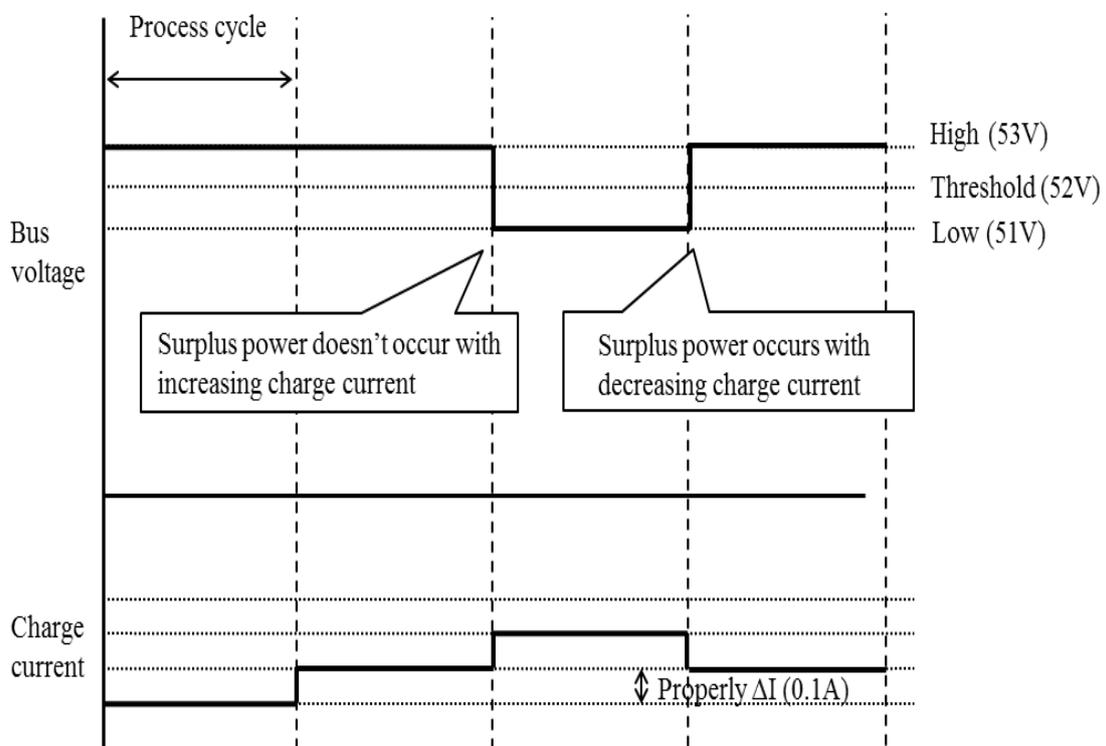


図 2.6 山登り法による充電電流の調整方法

図 2.6 に山登り法による充電電流の調整方法の概要図を示す。余剰電力発生時に、バス電圧が整流器の出力電圧(例:51V)からソーラーパネルのコンバータの出力電圧(例:53V)になることを利用して、バス電圧の閾値(例:52V)を設けて、閾値を超えるときには、蓄電池の充電電流を微少量(例:0.1A)増加させて余剰電力を充電する。やがて負荷電力と充電電力の和がソーラーパネルの発電電力を超え、余剰電力が発生しなくなると、整流器から出力されるため、バス電圧が閾値を下回る。このようにして閾値を下回るときには、充電による余分な商用電力使用量を最小化するために、充電電流を微少量減少させる。これを一定の処理周期で繰り返すことで、発電電力と負荷電力の差分に追従するように充電させることができる。

2.2.3 制御フロー

図 2.7 はパワーシフト制御の運用に必要な制御フローチャートの概略である。通常時、本制御はタイマー制御により大きく①PV 充電処理 (PV charge mode)、②強制放電処理 (Discharge mode)、③回帰処理 (Charge mode) の 3 つの処理に大別される。①PV 充電処理は電力需要の多い時間帯 (例:7:00-23:00) の内余剰電力が期待される時間帯 (例:7:00-15:00) に行われ、余剰充電制御が実施される。次に②強制放電処理は電力需要の多い時間帯におけるソーラーパネルの余剰電力が期待されない時間帯 (例:15:00-23:00) に行われ、基地局のバックアップ電源確保のために決定される SOC_{lim} を下限値として負荷電力を賄うように放電が実施される。最後に③回帰処理は、上記以外の夜間の時間帯に行われ、 SOC_0 まで充電が実施される。一方停電時には、負荷電力を賄うように緊急時の放電を優先し、復電後に SOC_{lim} よりわずかに小さく設けられる SOC_{rec} を下回る場合には、災害対策の観点から SOC_{lim} まで回復充電を行うことを優先し (Recovery charge mode)、 SOC_{lim} 到達後は待機状態に移行した後 (Wait mode)、タイマー制御により再び 3 つの処理に大別される。

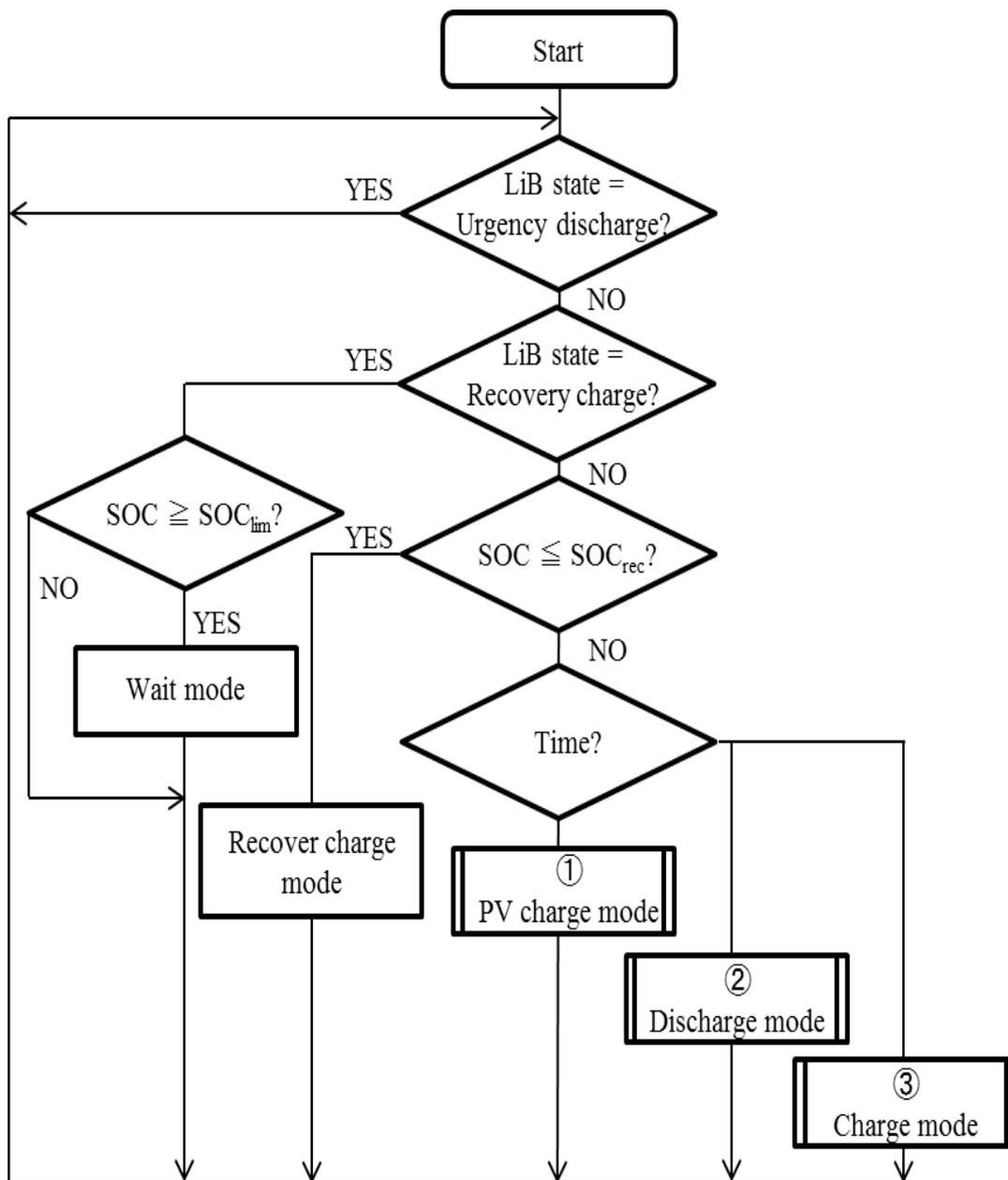


図 2.7 制御フローチャート

表 2.1 に実証試験に用いたパワーシフト制御の制御パラメータの一部を示す。特に No.7 から No.12 は余剰充電制御のためのパラメータである。実証試験ではまず余剰充電制御を確認し、次にパワーシフト手法の評価を実施した。

表 2.1 制御パラメータ

No.	Parameter	Description	Value
1	PV charge starting time	The timing charge initiated by charge current in accordance with bus voltage.	7:00
2	Discharge starting time	The timing discharge initiated by low limit SOC. If it will be low limit SOC, stand by.	15:00
3	Charge starting time	The timing charge (or discharge) initiated by default SOC. If it will be default SOC, stand by.	23:00
4	Base SOC (SOC_0)	Charge (or discharge) to default SOC during PV charge start time from default SOC starting time.	77%
5	Low limit SOC (SOC_{lim})	Discharge to low limit SOC during default SOC starting time from compulsion discharge starting time.	25%
6	Recovery charge SOC (SOC_{rec})	If it is less than compulsion charge SOC, charge it to low limit SOC.	24%
7	Bus voltage threshold	The threshold by which this judges fluctuation of the charging rate.	52.0 V
8	Default charging current	The charge starting value.	1 A
9	Maximum charging current	Maximum charging rate.	30 A
10	Increase current (ΔI)	(Bus voltage > bus voltage threshold) The increased current value.	50 mA
11	Decrease current	(Bus voltage \leq bus voltage threshold) The decreased current value.	50 mA
12	Process cycle	The setting, control, and watching cycle.	5 s

2.3 実証試験

図 1.2 をもとにした、本試験で用いた実証装置の仕様を表 2.2 に示す。容量 13.5kWh のリチウムイオン電池と定格出力 1.4kW のソーラーパネルを備えるグリーン基地局を用いて、パワーシフト手法の実証試験を実施した。フィールド試験局の負荷は 510W 程度である。

表 2.2 主要諸元

Elements	Data
Latitude	North latitude 36°21' 25"
Longitude	East longitude 139°14' 9"
Altitude	93 m
PV installation direction	Due south
PV installation angle	30°
Charge capacity	13.5 kWh
Load capacity	510 W
PV rated power	1.4 kW

2.3.1 余剰充電手法の試験結果

図 2.8 はある晴れた日の余剰充電制御の試験結果である。制御には、パラメータとして表 2.1 に示す No.7 から No.12 の設定値を使用した。ソーラーパネルが負荷電力以上に発電する時間帯において、リチウムイオン電池が充電しており、余剰電力を有効に充電していることがわかる。また、発電電力の変化に追従し充電していることが確認できた。

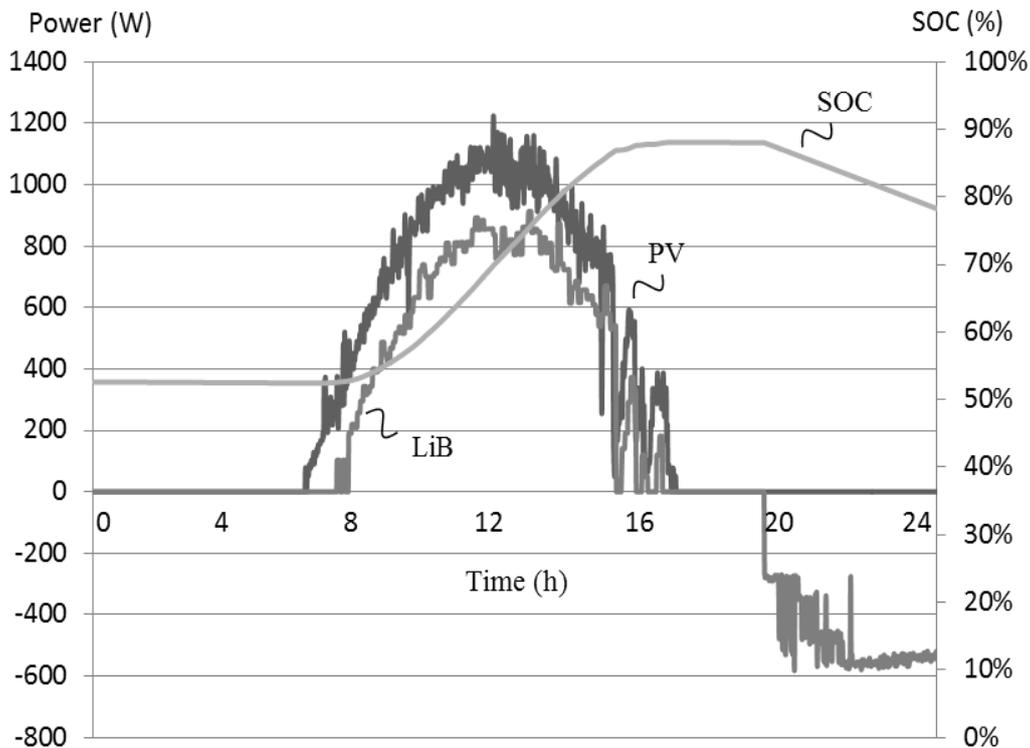


図 2.8 余剰充電制御の試験結果

2.3.2 パワーシフト手法の試験結果

パラメータとして表 2.1 に示す No.1 から No.12 の設定値を使用し、長期試験を実施した。試験期間中の天候割合は晴：15 日、曇：10 日、雨：4 日であり、天候に応じた発電量が確認できた。No.4 の SOC_0 の決定方法であるが、余剰充電制御により得られた発電量の実験結果を式(2.2)で最小二乗法によりフィッティングして、ソーラーパネルの最大出力電力 A と発電時間 T を求めた。図 2.9 にフィッティング結果を示す。フィッティングの結果 $A=1.15\text{kW}$ 、 $T=10\text{h}$ と求まり、式(2.7)に代入した結果 $SOC_0=77\%$ と設定値が導かれた。

図 2.10 から図 2.12 は、長期試験で測定した天候別の実験結果である。図 2.10 によると、晴れの日では日中の連続的な負荷電力以上の発電電力を確認し、曇りの日では日中の断続的な負荷電力以上の発電電力を確認し、雨の日では負荷電力以上の発電電力は発生しなかった。図 2.11 に示すように、晴れた日ではパワーシフト制御により電力需要の多い時間帯の商用電力の使用を抑えて運用でき

ていることを確認できた。また、図 2.12 によると、余剰充電制御により、晴れた日で最大 15.6%の SOC の増加を確認できた。式(2.7)で推定した結果と比較して、71.3%の増加にとどまったが、これは電源回路の変換効率によるもので、図 1.2 に示すように、ソーラーパネルの発電電力の充電は、太陽光発電変換回路と充放電回路を介して行われる。実験結果の 71.3%の増加からそれぞれの電源回路の変換効率は平均して 84.4%と求められ、入出力電圧などにより変換効率が変わることを考えると、想定の範囲内である。また、曇りの日には、PV 充電処理において日射量の減少により発電電力が負荷電力を下回る時間帯では SOC は一定となり、再び発電電力が負荷電力を上回るようになると、SOC が増加することを確認した。このことから余剰充電制御が余剰電力を有効に充電していることがわかる。

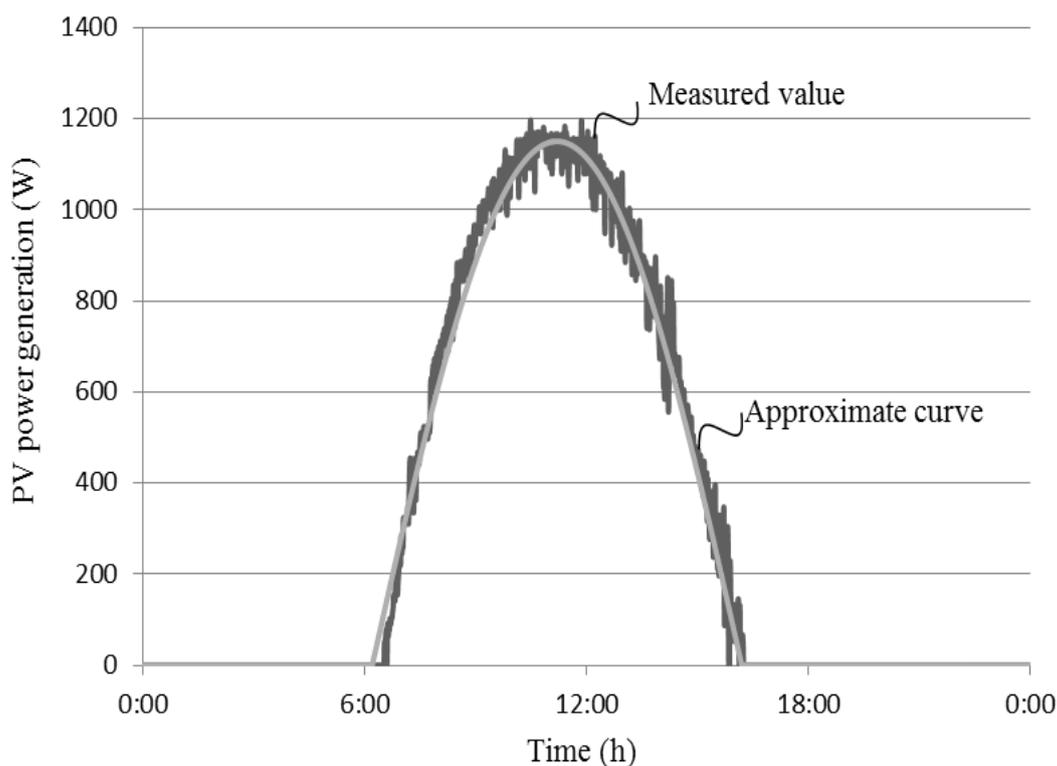


図 2.9 発電量モデルに基づくフィッティング結果

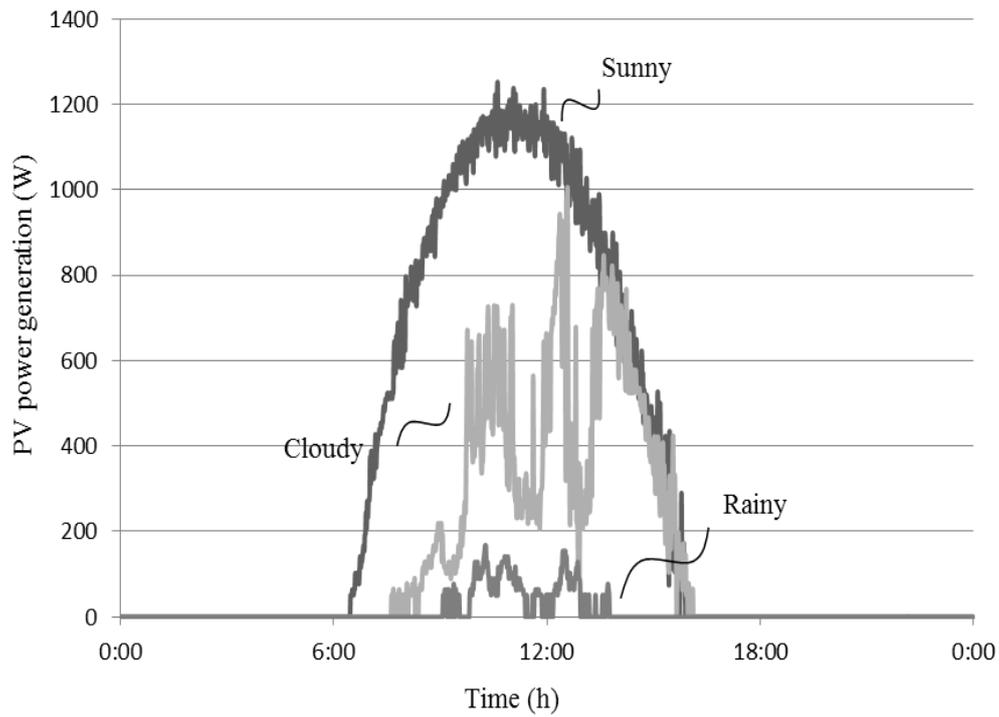


図 2.10 ソーラーパネルの出力特性

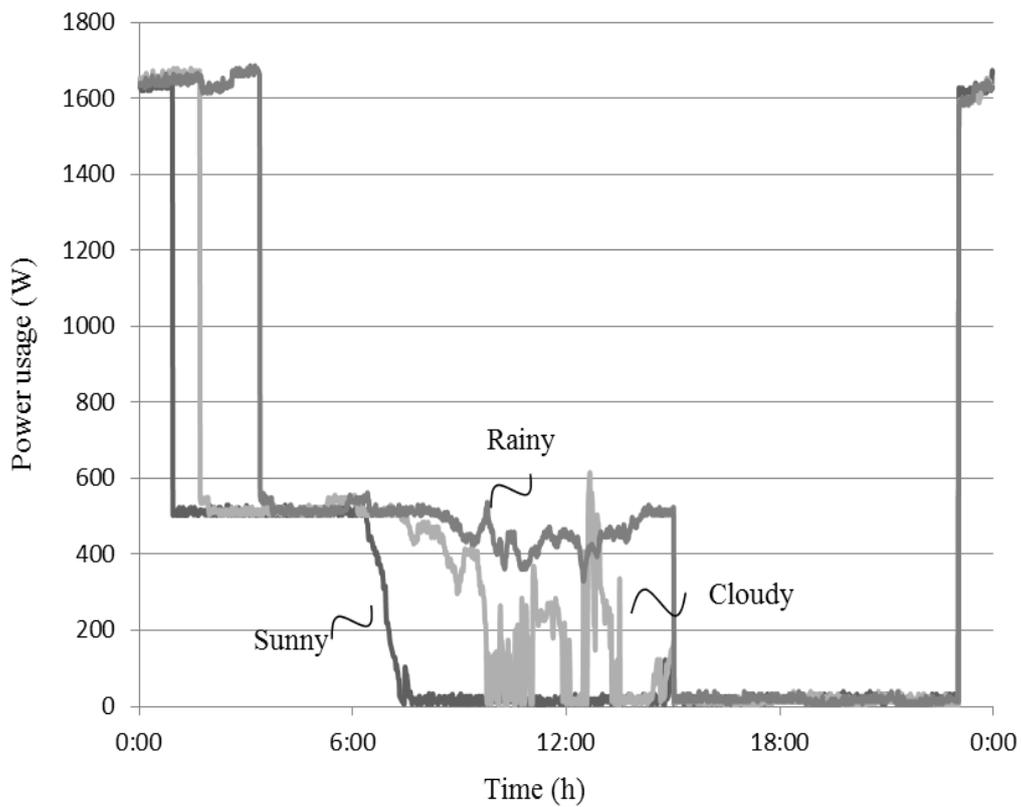


図 2.11 電力使用量の推移

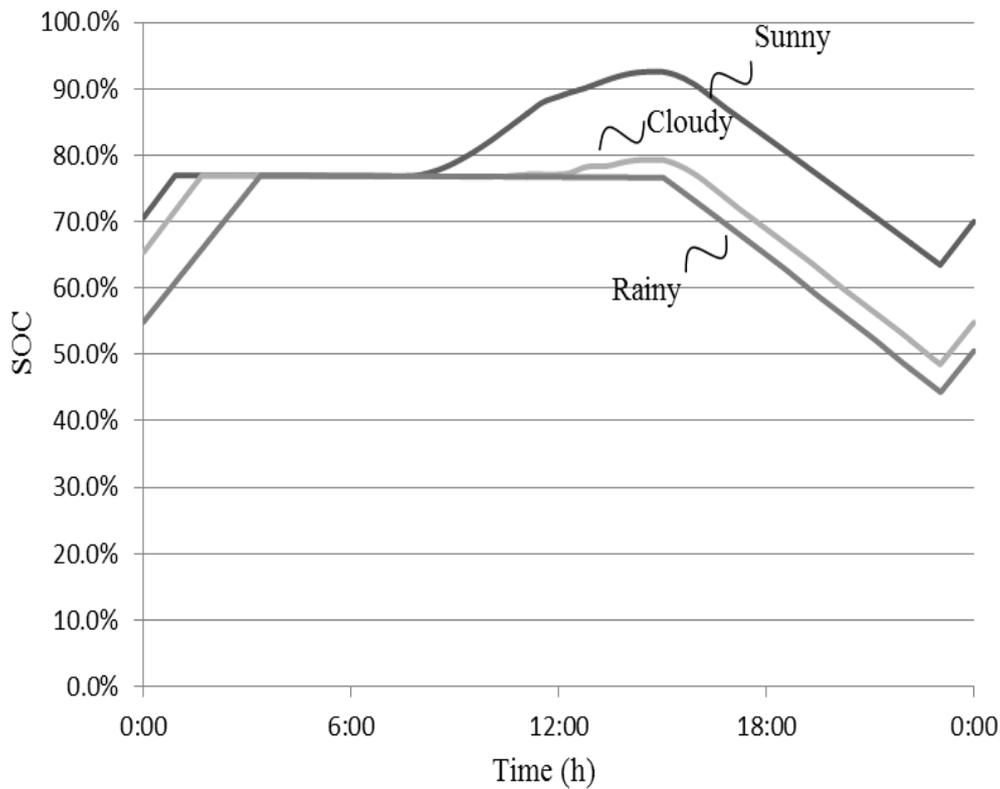


図 2.12 リチウムイオン電池の SOC の推移

29 日間の長期試験の結果、さまざまな天候条件において、期待していた動作を確認できた。試験期間中に測定した総発電量は 117.5kWh、通信装置の消費電力量は 357.0kWh、余剰充電量は 37.89kWh であり、これらの実験結果を式(2.1)に代入して、余剰電力を有効に活用したときの自家発電率 $F_1=32.9\%$ 、余剰電力を損失したときの自家発電率 $F_2=22.3\%$ とそれぞれ求め、 F_1 、 F_2 を式(2.6)に代入した結果、試験期間中の自家発電率向上効果は $F'=1.48$ と求まった。

パワーシフト制御を行うことで、従来に比べ自家発電率は 1.48 倍に改善され、自家発電率向上のためのパワーシフト制御の有効性を検証した。

2.4 本章のまとめ

無線基地局の環境負荷低減動作の実現に向けて電力の自家発電率を高めるパワーシフト手法を提案し、実際の無線基地局の構成において実証試験を行った。実証試験によって、提案方式である余剰充電制御を利用したパワーシフト制御が問題なく動作し、従来に比べて 1.48 倍の自家発電率の向上を確認した。

参考文献

- [53]新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編, 新太陽エネルギー利用ハンドブック , 日本太陽エネルギー学会, 東京, 2000.
- [54]鈴木孝宣, 後藤悠主, 寺園隆宏, 若尾真治, 大関崇, “Just-In-Time Modeling に基づく日射量予測手法の開発, ”電気学会論文誌 B, vol.131, no.11, pp.912-919, Nov. 2011.

第 3 章

天気予報連動の制御法

3.1 余剰電力の活用と自家発電率向上効果

図 1.2 の構成において、ある期間中の通信装置の消費電力量に占める発電量の活用割合としてグリーン基地局の動作時の自家発電率 F を定義する。

リチウムイオン電池の満充電容量を FCC として、ある 1 日のソーラーパネルの最大出力電力を A 、発電電力を $P(t)$ 、余剰電力量を S 、日の出時刻を $t=0$ 、日の入り時刻を $t=T$ 、夜間の発電電力を 0 、日の出時刻の SOC を $SOC_0(\%)$ とすると、ソーラーパネルの最大出力電力が負荷電力 Q 以下の場合 ($A \leq Q$)、有効に活用できる発電量 P_1 は以下の式(3.1)で表せる。

$$P_1 = \int_0^T P(t) dt \quad (3.1)$$

負荷電力 Q は厳密にはトラフィックに応じて微小量変動するが、およそ一定とみなせる。

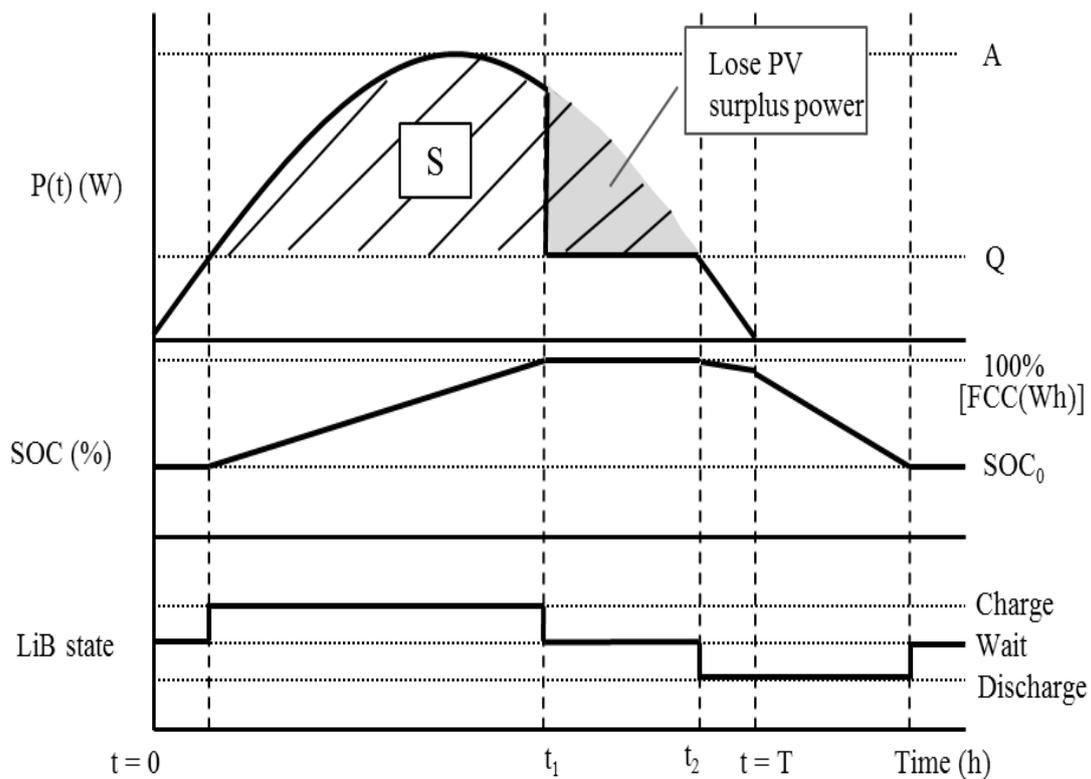


図 3.1 太陽光発電の余剰電力の損失

しかし、ソーラーパネルの最大出力電力が負荷電力 Q より大きい場合 ($A > Q$)、図 3.1 のように、あらかじめ定める SOC_0 の値によっては余剰電力を十分に充電できないときがある。

このとき、有効に活用できる発電量 P_2 は、満充電になる時間 t_1 、満充電以降発電電力が負荷電力を下回る時間 t_2 を用いて以下の式(3.2) で表せる。

$$P_2 = \int_0^{t_1} P(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} Q dt + \int_{t_2}^T P(t) dt \quad (3.2)$$

一方、ソーラーパネルの最大出力電力が負荷電力 Q より大きい場合 ($A > Q$) であり、余剰電力が十分に充電できるとき、有効に活用できる発電量 P_3 は以下の式(3.3)で表せる。

$$P_3 = \int_0^T P(t) dt \quad (3.3)$$

このとき、 N 日間の自家発電率 F は式(3.4)で表せる。

$$F = \sum \int \frac{P(t)}{Q} dt = \frac{1}{N} \left[\sum_l \int \frac{P_{1l}}{Q} dt + \sum_m \int \frac{P_{2m}}{Q} dt + \sum_n \int \frac{P_{3n}}{Q} dt \right] \quad (3.4)$$

ここで、 l は $A \leq Q$ を満たす日数、 m は $A > Q$ 、 $SOC_0 > 100 \times (1 - S/FCC)$ を満たす日数、 n は $A > Q$ 、 $SOC_0 \leq 100 \times (1 - S/FCC)$ を満たす日数であり、 $N = l + m + n$ が成り立つものとする。

自家発電率の年間シミュレーションのためには、基地局近傍の過去の日射量データから発電量を求め、式(3.4)から自家発電率を導出する必要がある。

図 3.2 は気象庁から発表される群馬県前橋市の 1 時間ごとの全天日射量データから、下記(1)-(3)の手順で発電量を算出して[55]、2013 年の年間自家発電率を導出したシミュレーション結果である。

- (1) 全天日射量を直達日射量と散乱日射量に分離(Erbs モデル使用[56])
- (2) 分離した値から斜面日射量を計算(Perez モデル使用[57])
- (3) 発電量(kWh)=斜面日射量(kWh/m²)×ソーラーパネルの定格出力(kW)
×システム出力係数÷標準日射強度(kW/m²)

このとき、手順(3)のシステム出力係数は 0.85、標準日射強度は 1 とする。ソーラーパネルの定格出力や満充電容量は経年劣化はなく一定として、充放電レートについて余剰発電分は十分に充電でき、負荷電力分は十分に放電できるものとする。また、横軸の SOC_0 は負荷電力を 6 時間賄えるバックアップ容量とする。

同図によると、ソーラーパネルの定格出力が負荷電力と同じときには、余剰電力が発生しないため、 SOC_0 の値によって自家発電率は変わらない。一方、ソーラーパネルの定格出力が負荷電力に対して 5 倍のときには、例えば、 $SOC_0=100\%$ のときに $F=37.7\%$ に対して、 $SOC_0=12.5\%$ のときに $F=69.8\%$ のように、1.85 倍に自家発電率が向上する。このように SOC_0 が小さい程自家発電率は大きくなる傾向にある。しかし、災害対策の観点からは、前述の通り、停電など非常時の電源確保のためなるべく SOC を高く保つ方が望ましく、両立に向けた最適化が必要となる。

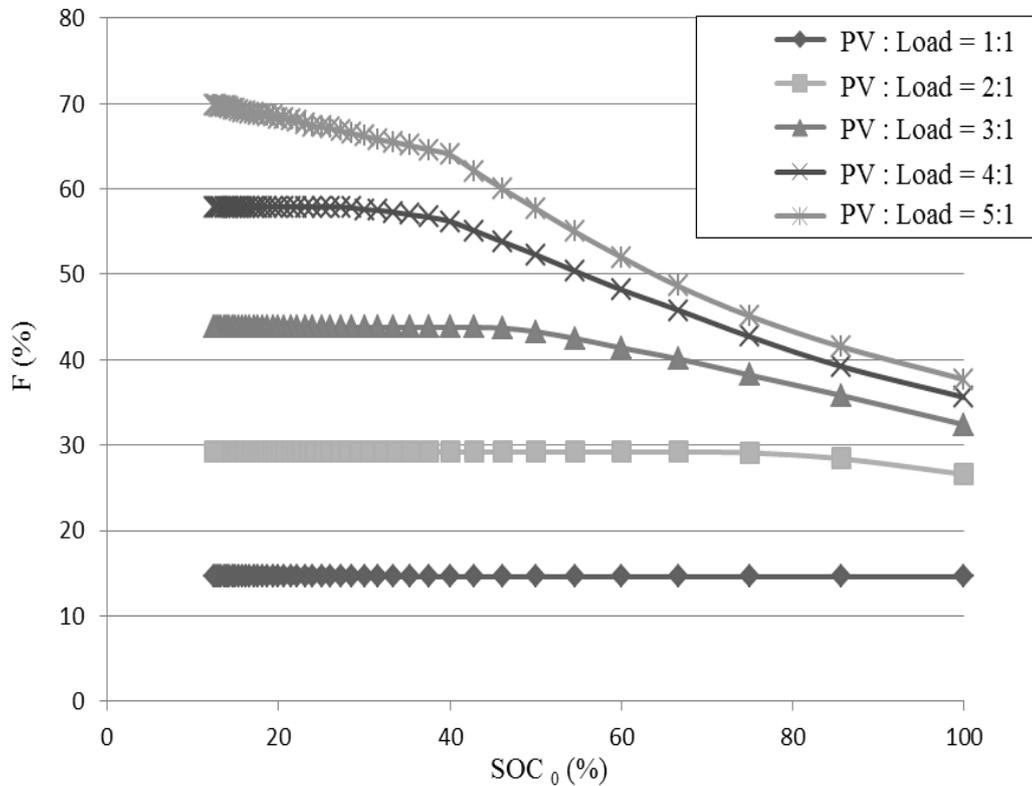


図 3.2 自家発電率のシミュレーション結果

3.2 天気予報連動制御

天気予報連動制御は通常時の制御と停電時の制御の2つを備えており、この2つの制御を用いて、環境貢献と災害対策を両立する手法を検討した。

3.2.1 制御概要

図 3.3 は通常時の制御を説明する概要図である。同図によると、前日の天気予報をもとに、明け方に放電を開始する。その後日中に余剰電力が発生した際には充電し、日没後に所定の SOC まで放電する。このように、天気予報情報からソーラーパネルの余剰電力量を推定して、事前に余剰電力分を充電できる容量を確保することにより、従来損失していたソーラーパネルの発電電力を有効に活用することをめざす。

次に図 3.4 は停電時の制御を説明する概要図である。同図は満充電状態から停電を仮定したときのバックアップ効果について示している。従来では、停電時にソーラーパネルの発電電力を通信装置に優先供給していたが、余剰電力を活用できていなかった。一方、本制御では、晴れの日の日中にはソーラーパネルの発電電力を通信装置に供給しつつ、余剰電力を充電することでサービス時間の延長をめざす。

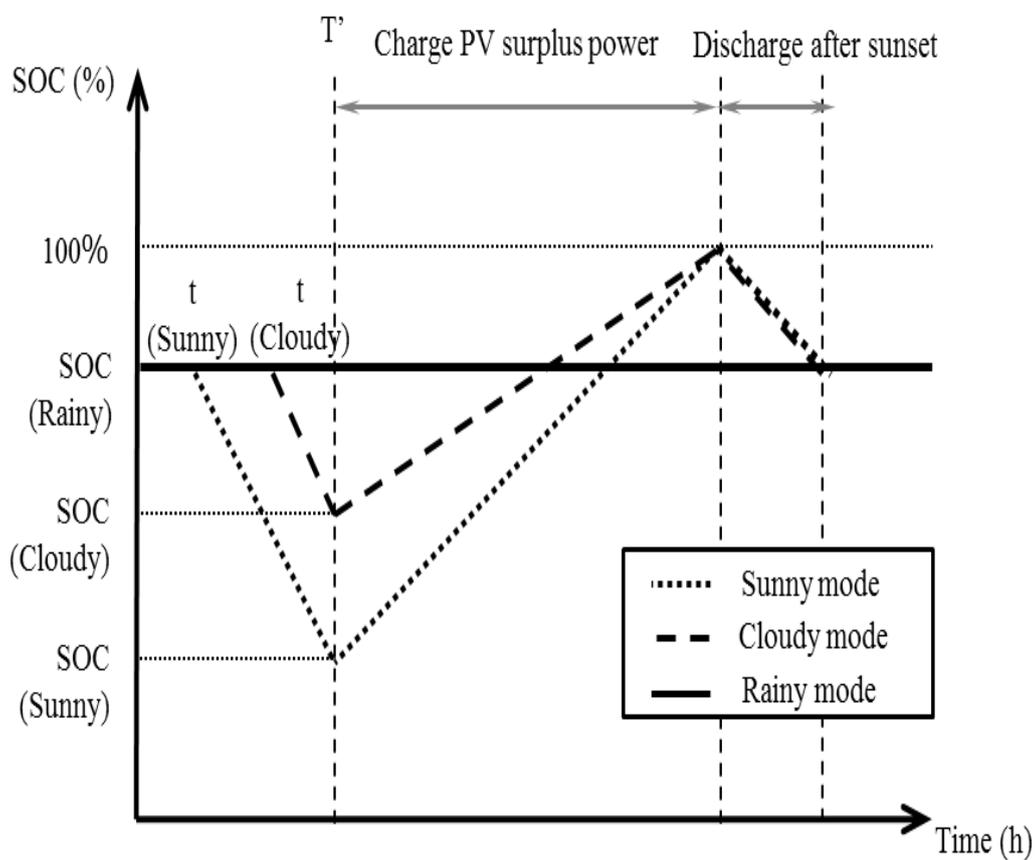


図 3.3 通常時の制御概要

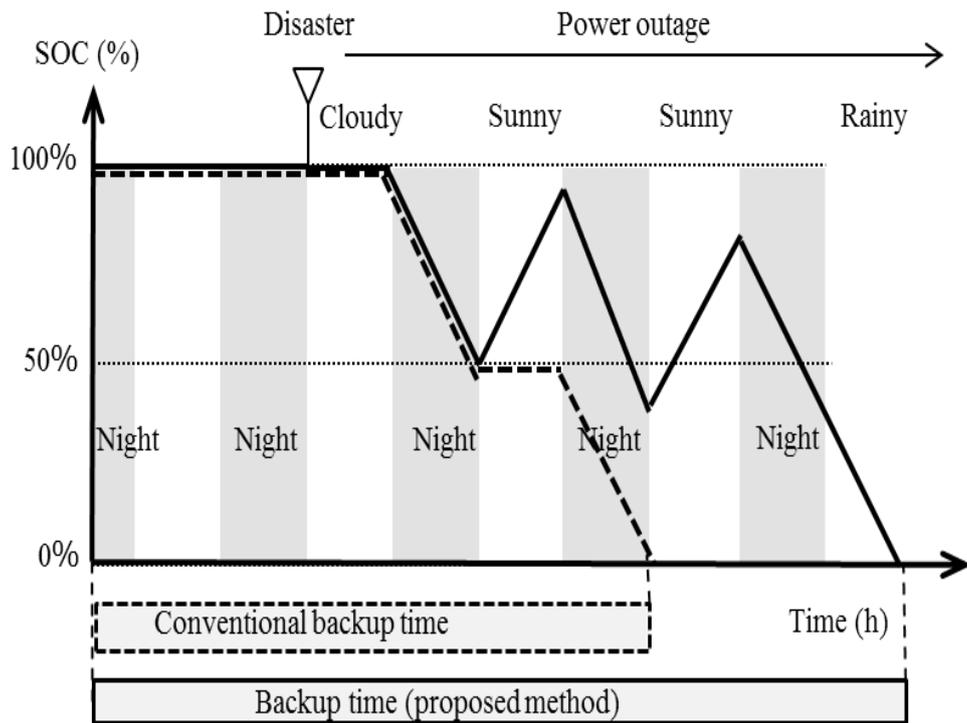


図 3.4 停電時の制御概要

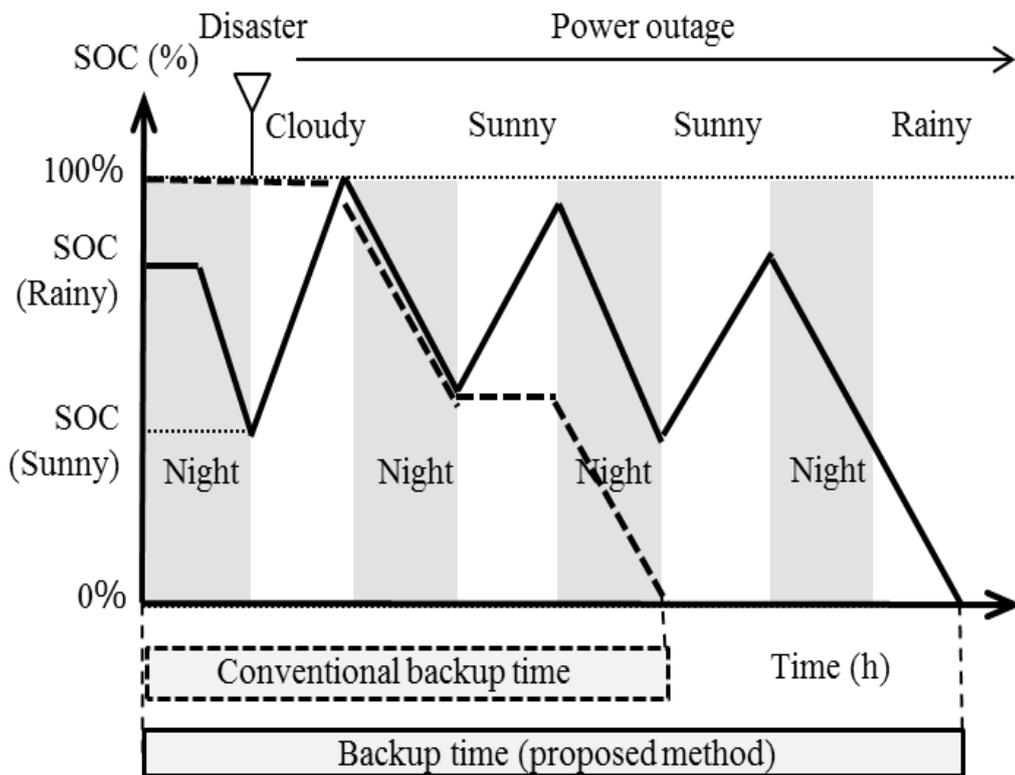


図 3.5 天気予報連動制御概要

この2つの制御により、図 3.5 に示すように、晴れが予報され SOC を下げたときに停電が発生した場合でも、通常時と同様にソーラーパネルの発電電力を最大限活用することで、高いバックアップ効果が期待でき、リチウムイオン電池のバックアップ時間の低さを補えるとともに、自立運転時間を延ばせることを提案する。

3.2.2 制御アルゴリズム

図 3.6 を用いて、通常時の制御の手法について述べる。本制御では、過去データをもとにパラメータを決定し、前日の天気予報情報をもとに当日の動作モードを決定する。雨の日、晴れの日、曇りの日の SOC はそれぞれ SOC_R 、 SOC_S 、 SOC_C とする。

SOC_R は停電時の通信確保のために必要なバックアップ分として決定され、 SOC_S は過去 1 カ月間で発生した最大の余剰電力量 S' が充電できるように決定され、 SOC_C は SOC_S と SOC_R の平均値から決定される。次に、余剰発電開始時刻 T' は過去 1 カ月間の余剰発電開始時刻の実績から最も早い時刻に決定される。最後に、放電開始時刻 t は電池の満充電容量と負荷電力を用いて余剰発電開始時刻 T' に所定の SOC となるように決定される。

余剰発電開始時刻 T' 以降はソーラーパネルの余剰電力を充電するように動作する。余剰電力が発生しない日没など夕方以降に設定される夕方放電開始時刻に到達すると、 SOC_R (バックアップ分) になるように電池は放電を開始し、 SOC_R 到達後は待機状態となる。

次に図 3.7 を用いて、停電時の制御の手法について述べる。同図の横軸は制御中の時間経過を示しており、縦軸はバス電圧と充電電流の変化を説明している。

余剰電力発生時に、バス電圧がソーラーパネルのコンバータの出力電圧 (例:53V) になることを利用して、バス電圧の閾値 (例:52V) を設けて、閾値を超えるときには、蓄電池の充電電流を微少量 (例:0.1A) 増加させて余剰電力を充電する。やがて部分影など発電電力が低下してバス電圧が停電検出の閾値 (例:46V) を下回るときには、図 1.2 の瞬停停電の切替回路により検出し、蓄電池が放電する。このときバス電圧は蓄電池の放電電圧となる。これを一定の処理周期で繰り返すことで、余剰電力を停電時にも充電する。

表 3.1 に実証試験に用いた天気予報連動制御の制御パラメータの一部を示す。

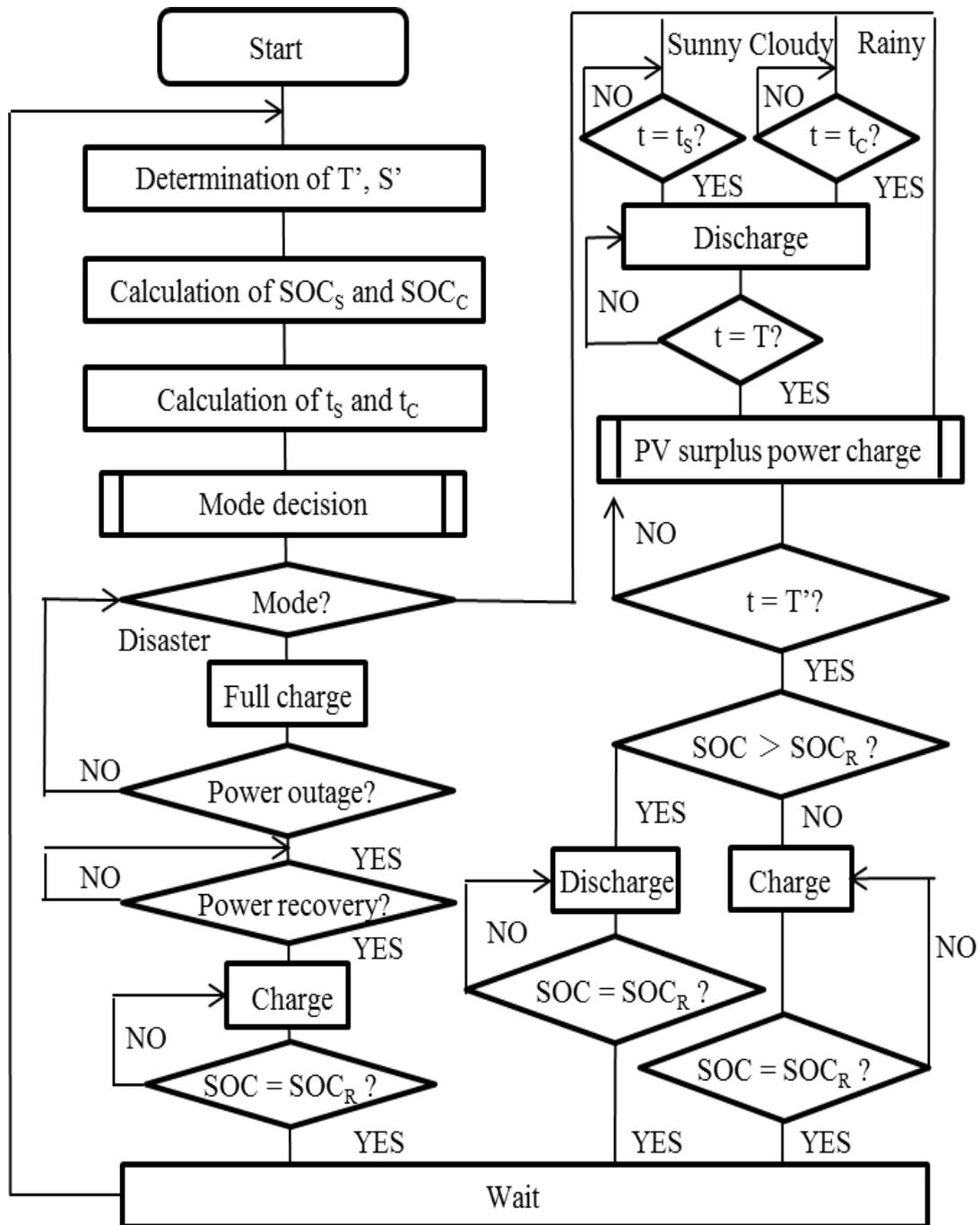


図 3.6 通常時の制御フローチャート

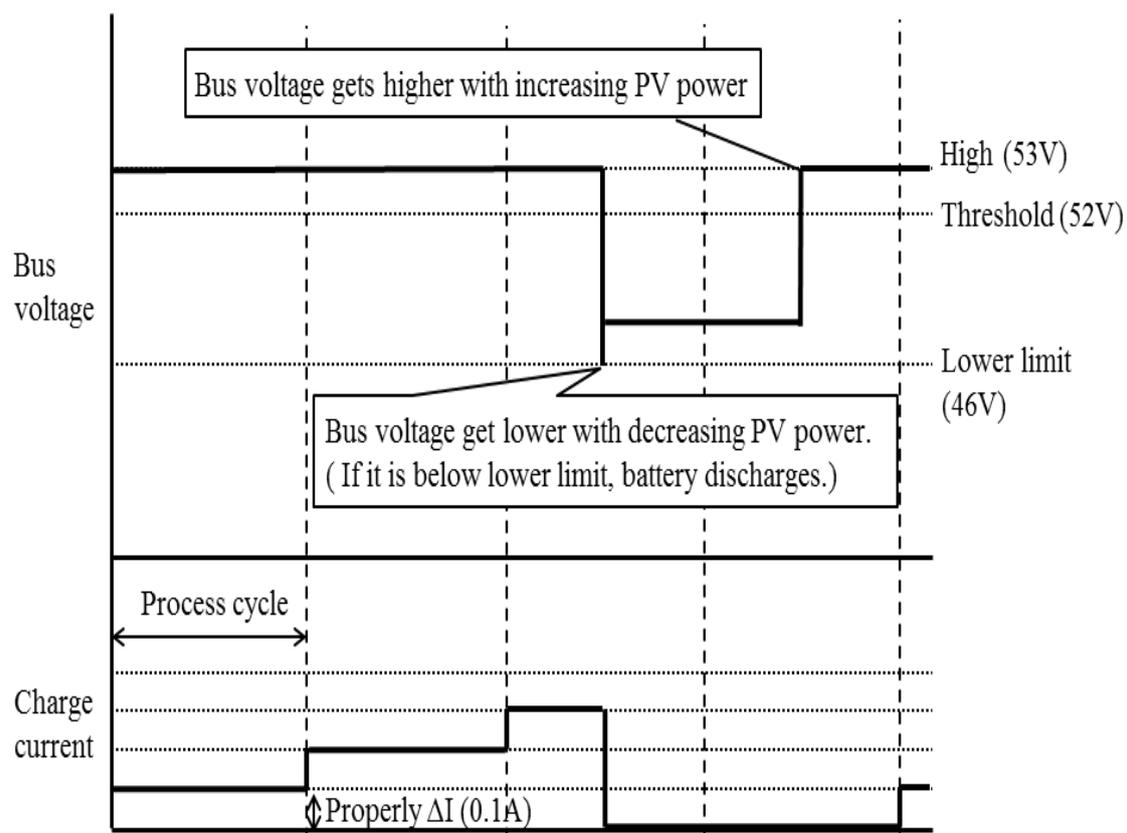


図 3.7 停電時の余剰電力の充電

表 3.1 制御パラメータ

No.	Parameter	Description	Value
1	PV charge starting time	The Assumed PV charge starting time	8:00
2	Surplus discharge starting time	The discharge starting time which is the part beyond Base SOC	15:30
3	Maximum power of surplus charge	The Assumed maximum power of the surplus charge	2.16 kW
4	Base SOC(Start SOC (Rainy))	Backup power standard SOC. The starting SOC which is at the rainy forecast	80%
5	Start SOC(Sunny)	The starting SOC which is at the sunny forecast	42.4%
6	Strat SOC(Cloudy)	The starting SOC which is at the cloudy forecast	61.2%
7	Discharge starting time(Sunny)	The discharge starting time which is at the sunny forecast	5:10
8	Discharge starting time(Cloudy)	The discharge starting time which is at the cloudy forecast	6:35
9	Blackout voltage threshold	Discharge starting by this voltage.	46.5 V
10	Bus voltage threshold	The threshold by which this judges fluctuation of the charging rate.	52 V
11	Default charging current	The charge starting value.	1 A
12	Maximum charging current	Maximum charging rate.	30 A
13	Increase current ($\angle I$)	(Bus voltage > bus voltage threshold) The increased current value.	50 mA
14	Decrease current	(Bus voltage \leq bus voltage threshold) The decreased current value.	50 mA
15	Process cycle	The setting, control, and watching cycle.	5 s

3.3 実証試験

本試験で用いた実証装置の仕様を表 3.2 に示す。定格出力 1.4kW のソーラーパネルを備えるグリーン基地局を用いて、天気予報連動制御の実証試験を実施した。フィールド試験局の負荷電力は約 0.5kW 程度である。

表 3.2 主要諸元

Elements	Data
Latitude	North latitude 36°21' 25"
Longitude	East longitude 139°14' 9"
Altitude	93 m
PV installation direction	Due south
PV installation angle	30°
Load capacity	500 W
PV rated power	1.4 kW

3.3.1 通常時の制御の試験結果

今回、電池容量 3.75kWh のリチウムイオン電池を用いて 2015 年 12 月 4 日から 2016 年 1 月 3 日にかけて長期試験を実施した。試験期間中の天候割合は晴：13 日、曇：11 日、雨：7 日であった。

図 3.8 から図 3.9 は、長期試験で測定した天候別の実験結果であり、図 3.8 は SOC の推移グラフ、図 3.9 は発電電力の推移グラフを示している。図 3.8 によると、明け方の放電による SOC 減少の様子から、所定の 3 パターンのモード（晴、曇、雨）に応じた制御ができていることが分かる。また、図 3.9 によると、晴れの日では日中の連続的な負荷電力以上の発電電力を確認でき、余剰電力を有効に活用できていることがわかる。また、曇りの日では日中の断続的な負荷電力以

上の発電電力を確認し、雨の日では負荷電力以上の発電電力は発生しなかった。

試験結果から、期間中の自家発電率として 40.4%を確認した。この値は余剰電力を十分に充電できるように SOC_0 を 12.5%に固定して同条件で試験を実施したときに、式(3.4)から導かれる試験期間中の自家発電率の推定値 42.5%と比較して小さいが、これは図 3.8 の晴れの日や曇りの日のグラフが示すように、想定以上の余剰電力量により夕方放電開始時刻前に満充電状態に達した日があり、一部の余剰電力を活用できなかったためと考える。

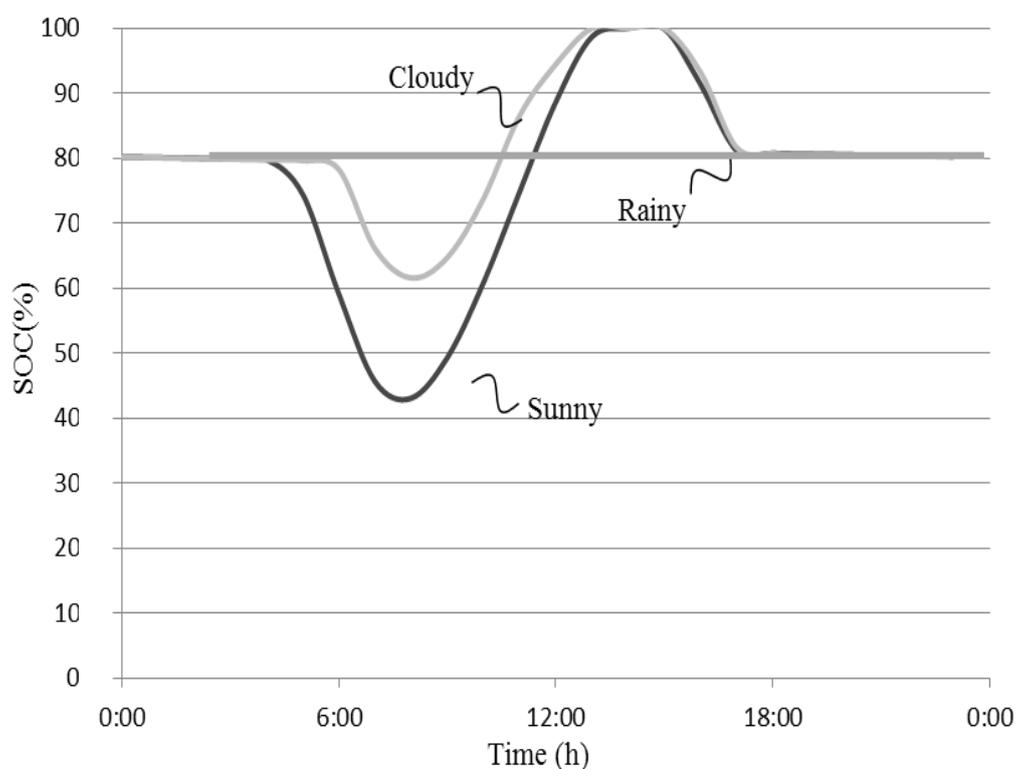


図 3.8 リチウムイオン電池の SOC の推移

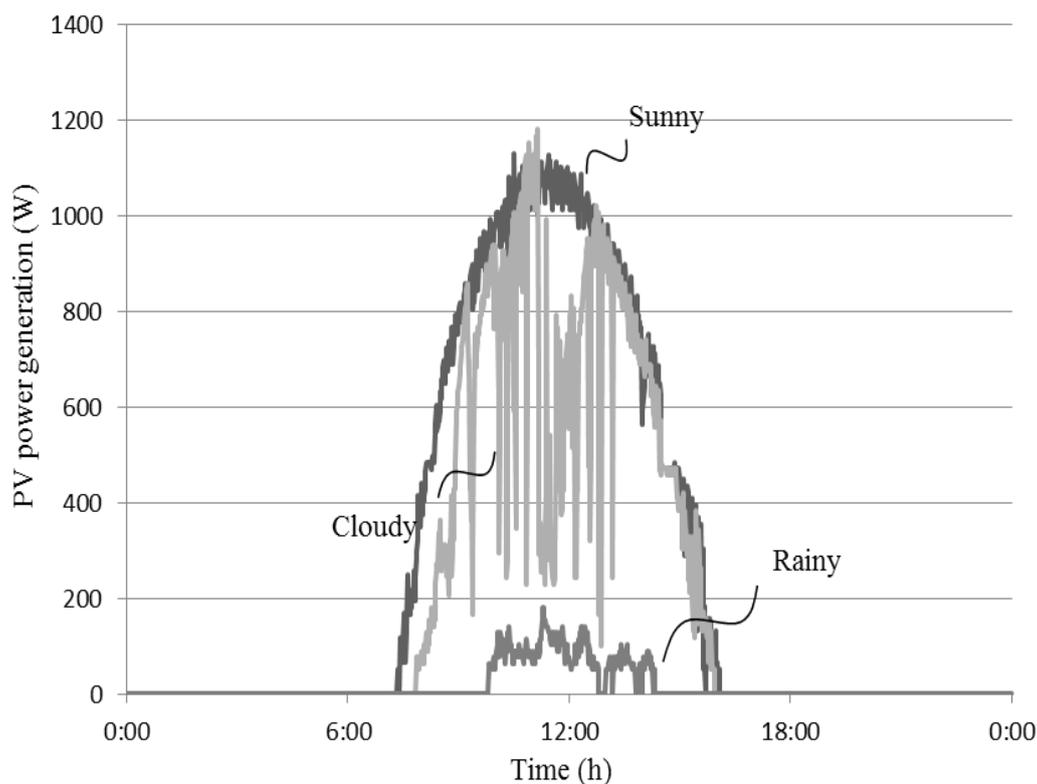


図 3.9 ソーラーパネルの出力特性

また、従来のように、 SOC_0 を負荷電力を6時間賄えるバックアップ容量に相当する80%に固定して同条件で試験を実施したときに、式(3.4)から導かれる試験期間中の自家発電率の推定値31.4%と比べて、試験結果から1.29倍の自家発電率の向上効果を確認した。さらに、余剰電力を十分に活用できたときの推定値42.5%と比べると最大で1.35倍の自家発電率の向上効果が期待できると考える。

3.3.2 停電時の制御の試験結果

次に、停電時の制御実施例として電池容量13.5kWhのリチウムイオン電池を用いて、無線基地局の整流器の電源をオフにすることで停電状態を再現し試験を行った。

図3.10に試験結果を示す。グラフはそれぞれ停電発生からのソーラーパネルの発電電力とリチウムイオン電池のSOCの推移である。停電時にもリチウムイオン電池への充電が確認され、余剰電力が有効に活用されたことが分かる。

試験結果から、停電時に余剰電力を充電できない従来の制御と比較して、自立

運転時間が約 1.34 倍になった。さらに、日中に蓄えた電力に応じて日没後もリチウムイオン電池からの電力供給により一定時間の無線基地局の運転を確認した。

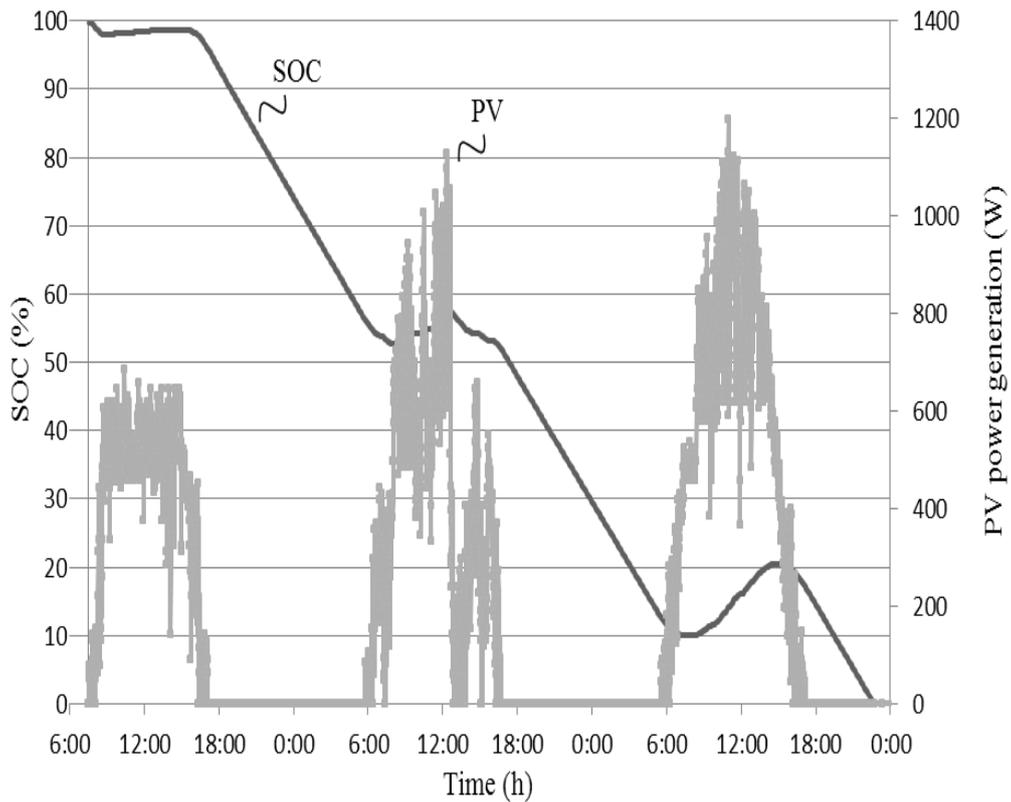


図 3.10 停電時の試験結果

3.4 本章のまとめ

基地局の自家発電率の向上と災害対策の両立に向けて、天気予報の情報を基にしてリチウムイオン電池を制御する天気予報連動制御を提案し、実際の無線基地局の構成において実証試験を行った。実証試験によって、天候別に問題なく動作し、従来に比べて 1.29 倍の自家発電率の向上を確認した。また、停電時にもソーラーパネルとの連携動作により、従来に比べて約 1.34 倍の自立運転時間を確認した。

参考文献

- [55] 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会編, ”日射,” 新太陽エネルギー利用ハンドブック , pp.13-41, 日本太陽エネルギー学会, 東京, 2000.
- [56] D.G. Erbs, S.A. Klein, and J.A. Duffie, “Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly Average Global Radiation,” Solar Energy, vol.28, no.4, pp.293-302, Apr. 1982.
- [57] R. Perez, R.Seals, P.Ineichen, R.Estimation and R.Stewart, “Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance,” Solar Energy, vol.44, no.5, pp.271-289, May. 1990.

第 4 章

受電電力平準化の制御法

4.1 基地局のデマンド値と蓄電池制御

図 4.1 に基地局の電力需要の一例を示す。電力負荷が安定している通信装置がある一方、空調などの負荷は気温や天候などで変動している。この場合、負荷のピークに備えて電力設備を構築する必要があり、余剰の設備投資が発生することや、契約電力が上がり電気料金が高くなるなどの課題があり、受電電力の平準化が求められている。また、受電電力平準化により、電力需要の急激な増減に伴う電力安定供給上のリスクを軽減し、電力系統の安定化にも寄与することができ、その技術は有望である。

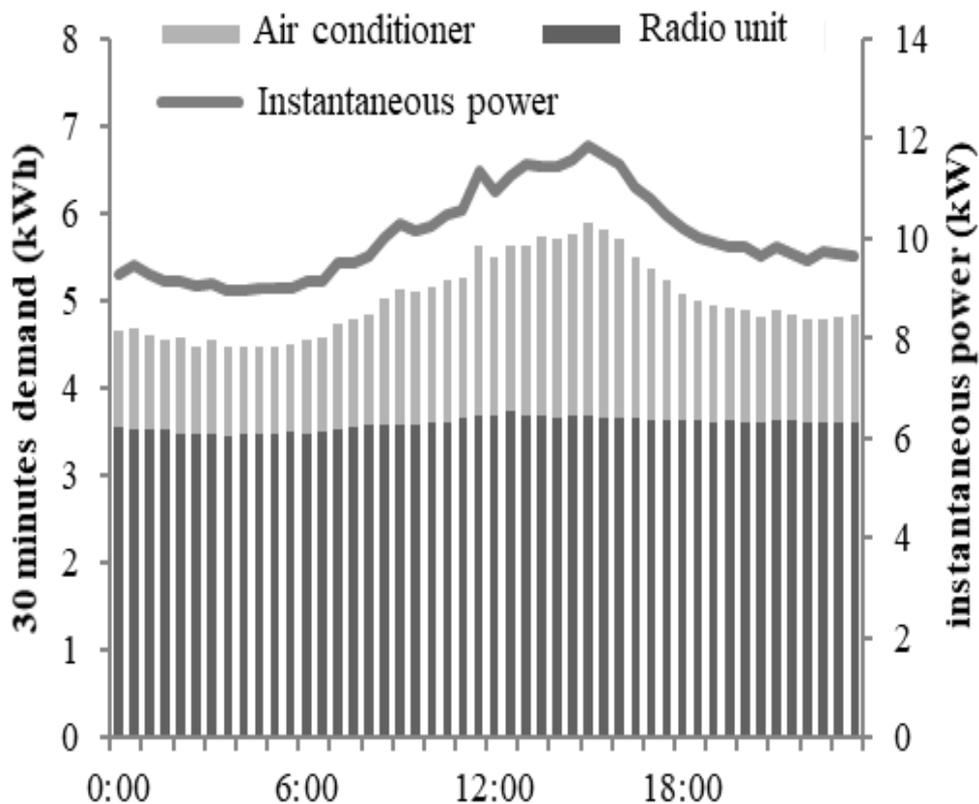


図 4.1 基地局の電力需要の一例

蓄電池を備える太陽光発電システムにおいて効果的に受電電力の平準化を行う手法として、発電量と負荷の変動を予測することで、受電電力を平準化するように、蓄電池の充放電計画を作成する方法が報告されている[58]。本章ではスマートメータの瞬時電力値を活用した蓄電池のフィードバック制御により、発電量や負荷の予測精度に依存しない受電電力の平準化手法について提案する。グリーン基地局に設置の大容量リチウムイオン電池を活かして、災害時のバックアップ容量を確保した上で、残りのリチウムイオン電池の容量を最適に平時に活用することで、電力需要のピーク削減を実現する受電電力の平準化制御法を提案して、群馬県に構築したフィールド試験局で検証した試験結果について述べる。

図 4.2 にグリーン基地局の電源制御部である xEMS とスマートメータとの接続構成、図 4.3 に xEMS の写真を示す。xEMS は充放電量を指令するとともに、スマートメータと B ルート接続[26]することで瞬時電力値を取得する役割を担っている。この毎分取得するスマートメータの瞬時電力値をもとに、A ルート情報[59]である電気料金計算で用いられる 30 分間の平均受電電力（以下、「デマンド値」と呼ぶ）のピークを抑制するような充放電制御を検討する。

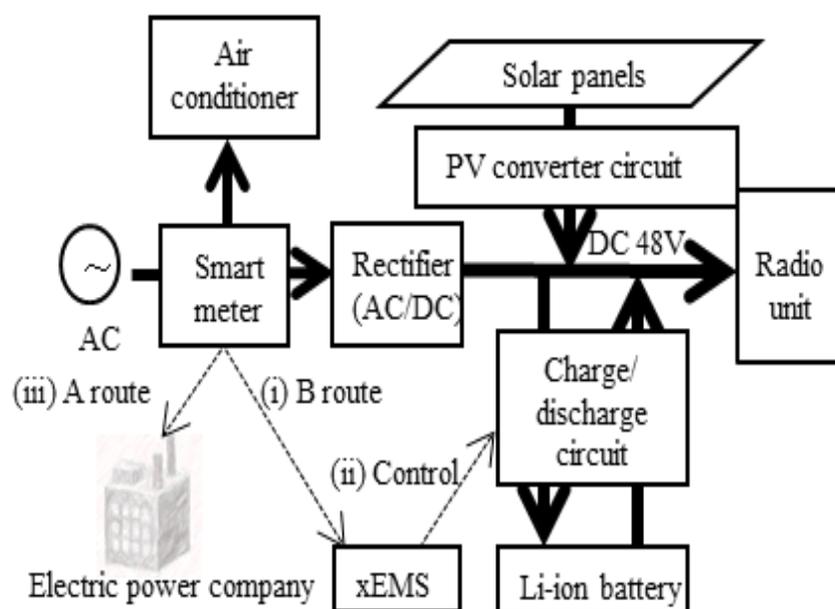


図 4.2 グリーン基地局の xEMS とスマートメータとの接続構成

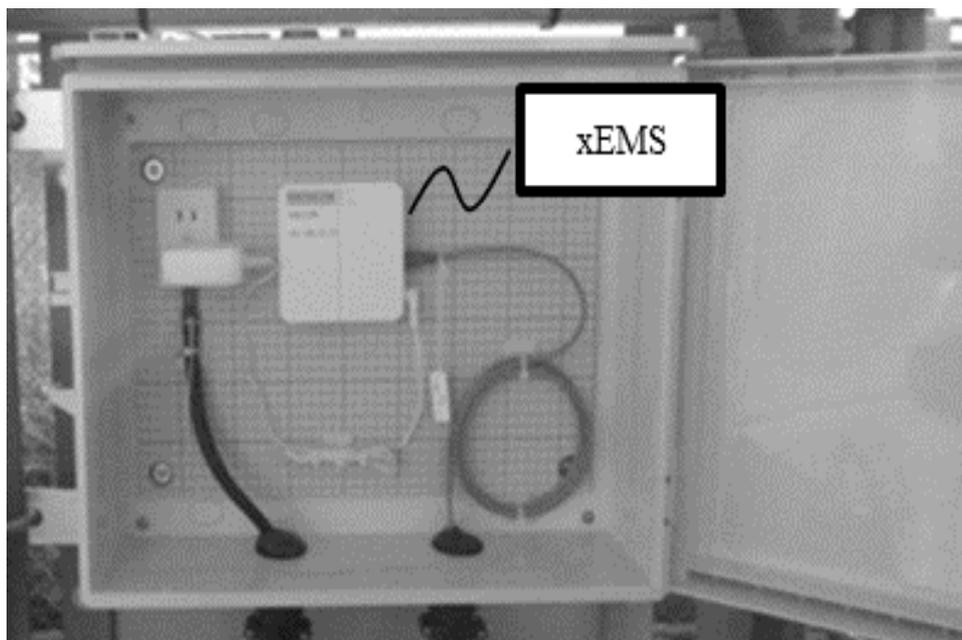


図 4.3 xEMS の設置の様子

図 4.4、図 4.5 は蓄電池の充放電によるデマンド値の変化を示している。同図はソーラーパネルを備えていない従来の基地局で測定した実験結果である。

ここでベースラインとは制御を行わなかった場合に想定されるデマンド値であり、一般的に用いられる High 4 of 5 と呼ばれる下記の①～③の手順の計算方法を使用して、導出している[60]。

- ① 制御実施日を含まない直近 5 日間のうち、実施時間帯の平均需要量の多い 4 日間のデマンド値の平均値を算出する。
- ② 制御実施の 4 時間前から 1 時間前までの 6 個のデマンド値の平均値を算出する。
- ③ ①で算出された各デマンド値に対して、②で算出された値を加算した値を、ベースラインとする。

図 4.4 は 15:00 まで待機状態として、15:00 から 18:00 にかけて放電を実施し、

18:00 に待機状態に戻したときのグラフである。放電時間帯において、ベースラインに比べてデマンド値は小さくなり、その差分の平均値は 3.64 kW であった。一方、このときの蓄電池の放電は一定で約 3.6 kW であり、蓄電池の放電電力に応じた抑制効果を確認することができた。

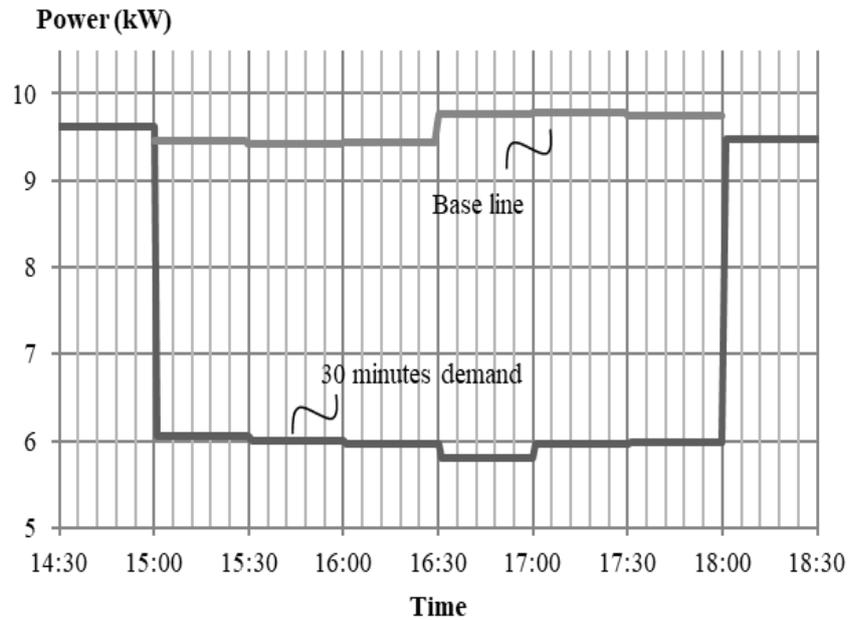


図 4.4 蓄電池の放電とデマンド値

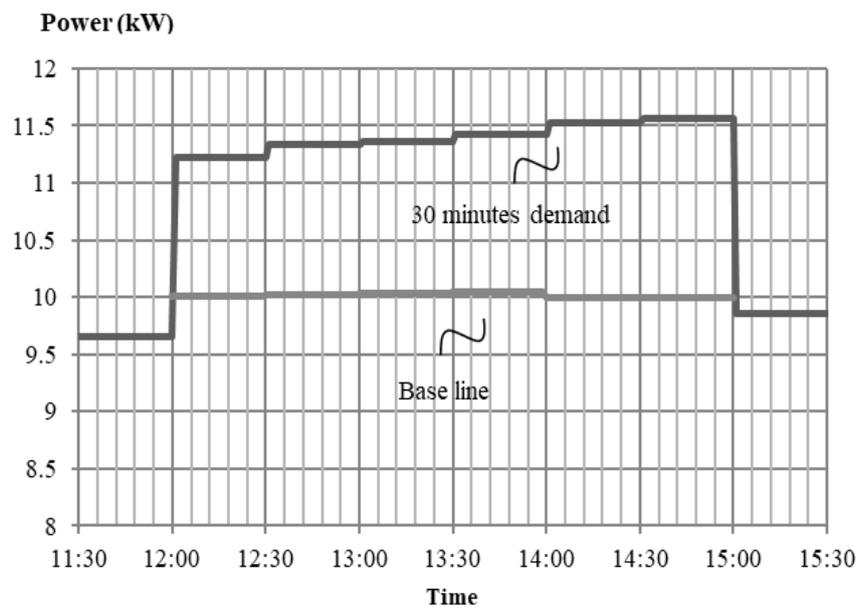


図 4.5 蓄電池の充電とデマンド値

図 4.5 は 12:00 まで待機状態として、12:00 から 15:00 にかけて充電を実施し、15:00 に待機状態に戻したときのグラフである。充電時間帯において、ベースラインに比べてデマンド値は大きくなり、その差分の平均値は 1.39 kW であった。一方、このときの蓄電池の充電は一定で約 1.38 kW であり、蓄電池の充電電力に応じた増大効果を確認することができた。

次章では、グリーン基地局を想定して、蓄電池の充放電により、デマンド値を抑制する平準化制御法を提案する。

4.2 平準化制御法

グリーン基地局の受電電力の変動の要因は主に空調機の消費電力と太陽光発電の出力にあり、これらは気温や天候に大きく依存し不安定であるため、受電電力の正確な予測は困難である[61][62]。そのため、スマートメータから取得する瞬時電力値を活用して、蓄電池のフィードバック制御を行うことで、デマンド値を平滑化する手法を検討する。

4.2.1 制御理論

図 4.6 に平準化制御法の概要を示す。充放電制御がないときに想定されるスマートメータから取得する瞬時電力値 P が閾値 P_{th} を上回る場合には超えた分を蓄電池から放電し、下回る場合には足りない分を蓄電池に充電させる。 x を充放電量（放電：正、充電：負）として、時刻 t のときの蓄電池の計画充放電量 $x'(t)$ を式(4.1)の通り定める。

$$x'(t) = x(t - 1) + P(t) - P_{th} \quad (4.1)$$

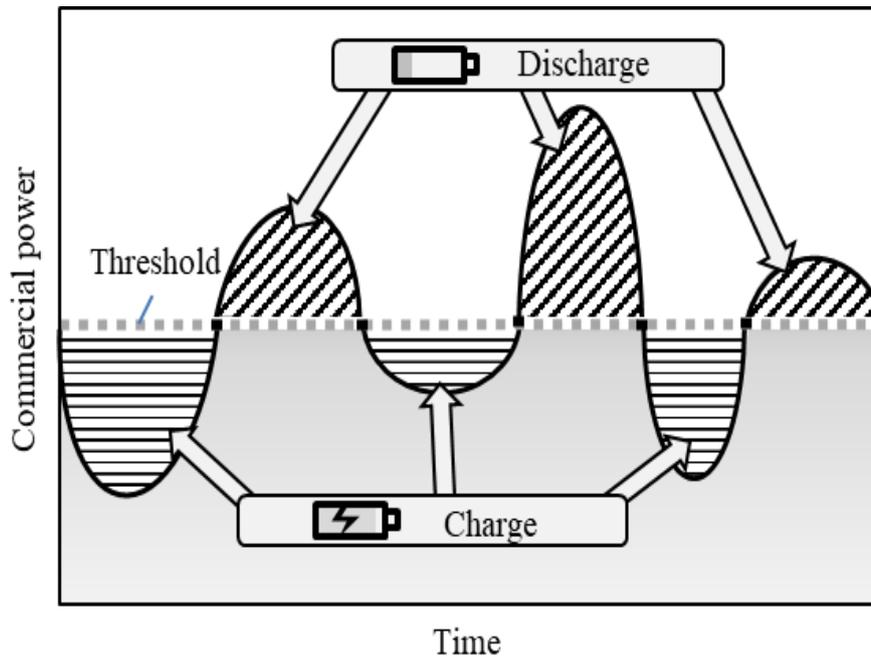


図 4.6 平準化制御法の概要

基地局において蓄電池のバックアップ容量の確保は停電などの災害対策の観点から重要であるため、放電可能な SOC 範囲として、下限値 SOC_{low} を定める。また、電池保護の観点から過充電とならないように同じく充電可能な SOC 範囲として、上限値 SOC_{high} を定める。充電可能 SOC 及び放電可能 SOC を満たす範囲で充放電するとき、計画充放電量 $x'(t)$ と等しくなるように充放電量 $x(t)$ を定める。

また、理想的な環境において、受電電力 d は無線機の消費電力 q と太陽光発電装置の発電量 Pg 及び蓄電池の充放電量 x を用いて式(4.2)で表すことができ、一方、時刻 t のときの瞬時電力値 $P(t)$ と前回充放電量 $x(t-1)$ を用いて、式(4.1)から計画充放電量 $x'(t)$ を導き、その後に充放電量 $x(t)$ を定めることから、時刻 t にスマートメータから瞬時電力値 $P(t)$ を取得した瞬間の充放電量は前回充放電量 $x(t-1)$ であり、時刻 t の無線機の消費電力 $q(t)$ と太陽光発電装置の発電量 $Pg(t)$ を用いて、瞬時電力値 $P(t)$ は式(4.3)で表すことができる。

$$d(t) = q(t) - x(t) - Pg(t) \quad (4.2)$$

$$P(t) = q(t) - x(t - 1) - Pg(t) \quad (4.3)$$

式(1)~式(3)から、充電可能 SOC 及び放電可能 SOC を満たす範囲で充放電するとき、すなわち、 $x(t)=x'(t)$ が成り立つときには、式(4)が導かれ、受電電力 d は閾値 Pth と等しくなることがわかる。これは閾値 Pth が受電電力の目標値として扱えることを示している。表 4.1 に制御の推移の一例を示す。

$$d(t) = Pth \quad (4.4)$$

表 4.1 提案制御による計算例

Time t(s)	Threshold Pth(W)	power consumption q(W)	PV power Pg(W)	charge / discharge x(W)	instantaneous power P (W)	electricity consumption d(W)
0	2	9	6	1	3	2
1	2	10	6	2	3	2
2	2	9	6	1	1	2
3	2	10	6	2	3	2
4	2	9	6	1	1	2
5	2	11	6	3	4	2

4.2.2 制御アルゴリズム

図 4.7 を用いて、制御の手法について述べる。毎分取得する蓄電池の SOC と瞬時電力値 P の情報をもとに毎分、充放電量 x を決定する。

計画充放電量 x' は式(4.1)から導かれ、計画充放電量 x' が正の場合で、且つ SOC が SOC_{low} より大きい場合には、放電可能と判断して、充放電量 x を計画充放電量 x' に設定する。一方、計画充放電量 x' が正の場合でも、SOC が SOC_{low} より小さい場合には、放電不可と判断して、待機状態に設定する。

また、計画充放電量 x' が負の場合で、且つ SOC が SOC_{high} より小さい場合には、充電可能と判断して、充放電量 x を計画充放電量 x' に設定する。一方、計画

充放電量 x' が負の場合でも、SOC が SOC_{high} より大きい場合には、充電不可と判断して、待機状態に設定する。

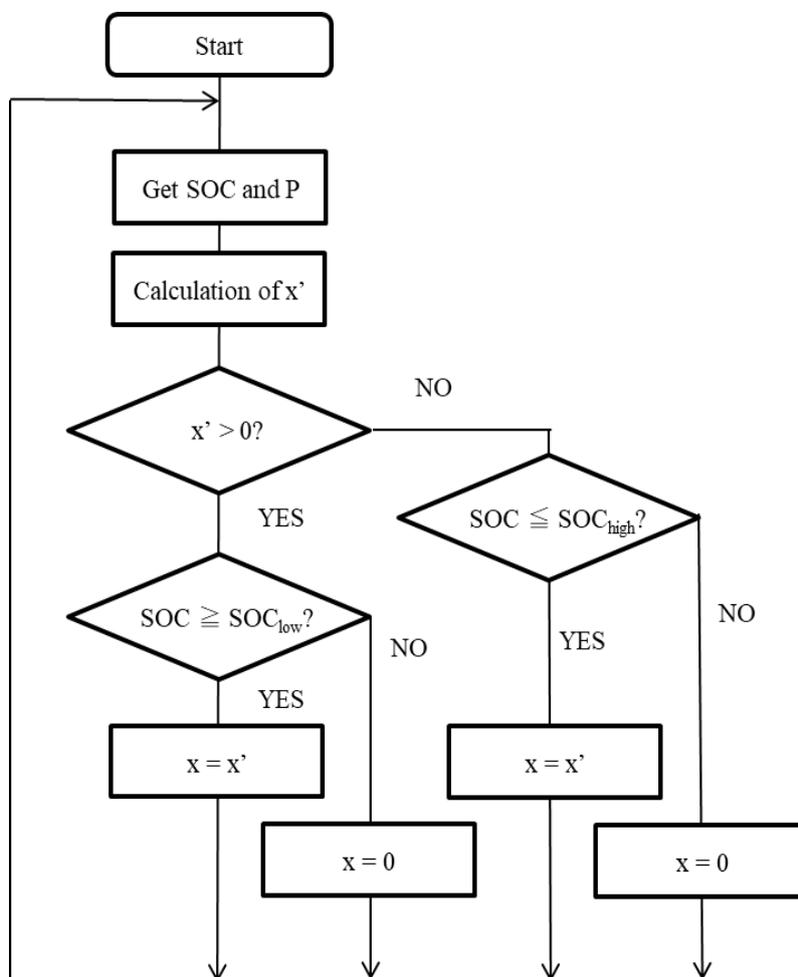


図 4.7 制御フローチャート

表 4.2 に実証試験に用いた平準化制御法のパラメータの一部を示す。閾値 P_{th} について、小さな値に設定することは電力需要のピーク削減及び契約電力を抑えることによる電気料金削減の観点で望ましいが、制御を行わないときの通常時の基地局の平均受電電力に比べて低く設定してしまうと蓄電池が放電し続け枯渇する、もしくは必要とするバックアップ容量を下回る可能性があるため、基地局の平均受電電力に設定することが望ましい。今回は過去データをもとに平均受電電力 1750 W を測定し、閾値 P_{th} とした。また、スマートメータから最短で 1 分間隔で瞬時電力値を取得できることから、制御周期を 1 分間隔とした。

表 4.2 制御パラメータ

No.	Parameter	Description	Value
1	Low limit SOC (SOC_{low})	Discharge to low limit SOC.	60%
2	High limit SOC (SOC_{high})	Charge to high limit SOC.	100%
3	Threshold (P_{th})	The threshold for judging charge/discharge.	1750 W
4	Process cycle (Δt)	The setting, control, and watching cycle.	1 min

4.3 実証試験

本試験で用いた実証装置の仕様を表 4.3 に示す。容量 13.5kWh のリチウムイオン電池と定格出力 1.4kW のソーラーパネルを備えるグリーン基地局を用いて、平準化制御法の実証試験を実施した。フィールド試験局の負荷電力は約 0.5kW 程度である。

表 4.3 主要諸元

Elements	Data
Latitude	North latitude 36°21' 25"
Longitude	East longitude 139°14' 9"
Altitude	93 m
PV installation direction	Due south
PV installation angle	30°
Charge capacity	13.5 kWh
Load capacity	510 W
PV rated power	1.4 kW

図 4.8 から図 4.10 はある 3 日間の試験結果であり、図 4.8 は瞬時電力値、デマンド値、充放電量のグラフを示している。同図から日中は充電され、夜間に放電されていることがわかる。これはソーラーパネルの発電により、日中の電力需要が夜間と比較して削減されたためである。

図 4.9 は制御の有無の比較を示しており、蓄電池の充放電制御により、デマンド値が平準化されていることがわかる。二日目の試験結果によると、デマンド値の変動幅は約 173W であり、充放電制御がないときの想定される変動幅である約 1016W と比べて、一日のデマンド値の変動幅を約 17%まで抑制できることを確認した。

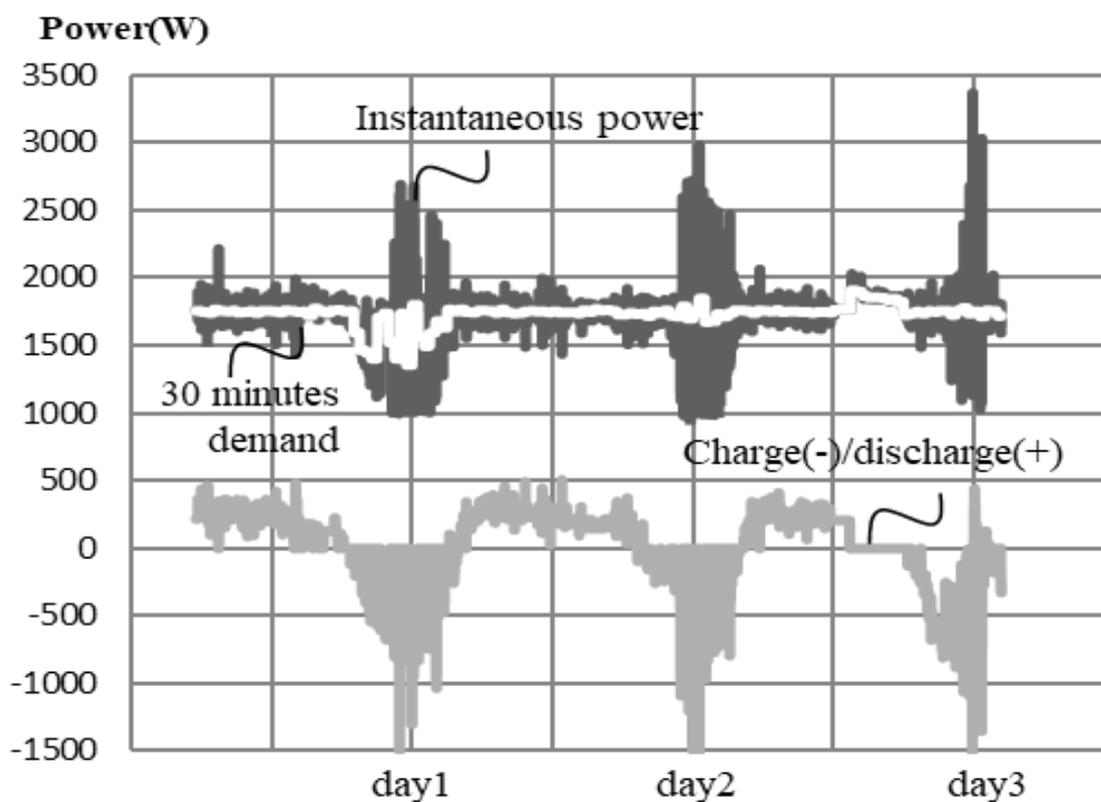


図 4.8 蓄電池制御結果

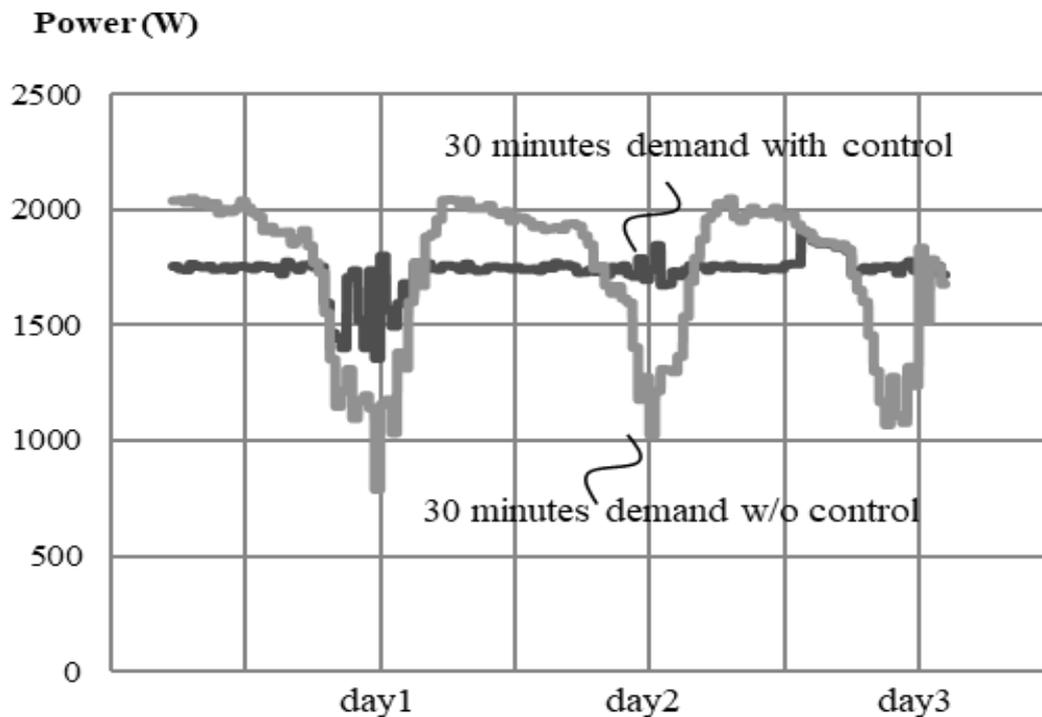


図 4.9 平準化効果

図 4.10 はソーラーパネルの出力特性を示している。蓄電池の充放電制御により、フィールド試験局の負荷電力以上の発電を確認した。これは従来、有効に無線機に供給できずに熱として損失していたはずの余剰発電分を蓄電池に充電したことを示しており、充放電制御がないときに比べて、再生可能エネルギーの利用効率を向上することができた。

図 4.11 に閾値 P_{th} を 1750W から 1850W に変更して実施した 4 日間の試験結果を示す。蓄電池の SOC のグラフから、充電可能 SOC 及び放電可能 SOC を満たす範囲で運用できていることがわかる。また、発電量のグラフから、日々の発電を確認できており、有効に発電電力を活用しつつ制御が行われていることがわかる。図 4.8 に示す期間中のデマンド値の平均値が約 1736W であったのに対して、図 4.11 に示すデマンド値の平均値は約 1852W であった。いずれの平均値も閾値に対して誤差 1%以内の精度を確認した。

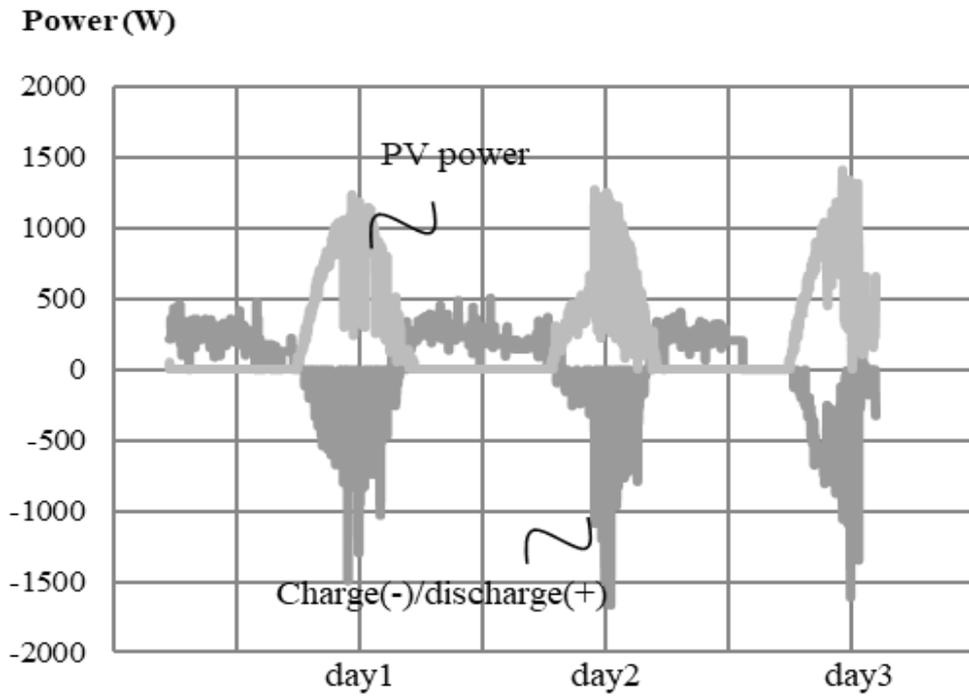


図 4.10 ソーラーパネルの出力特性

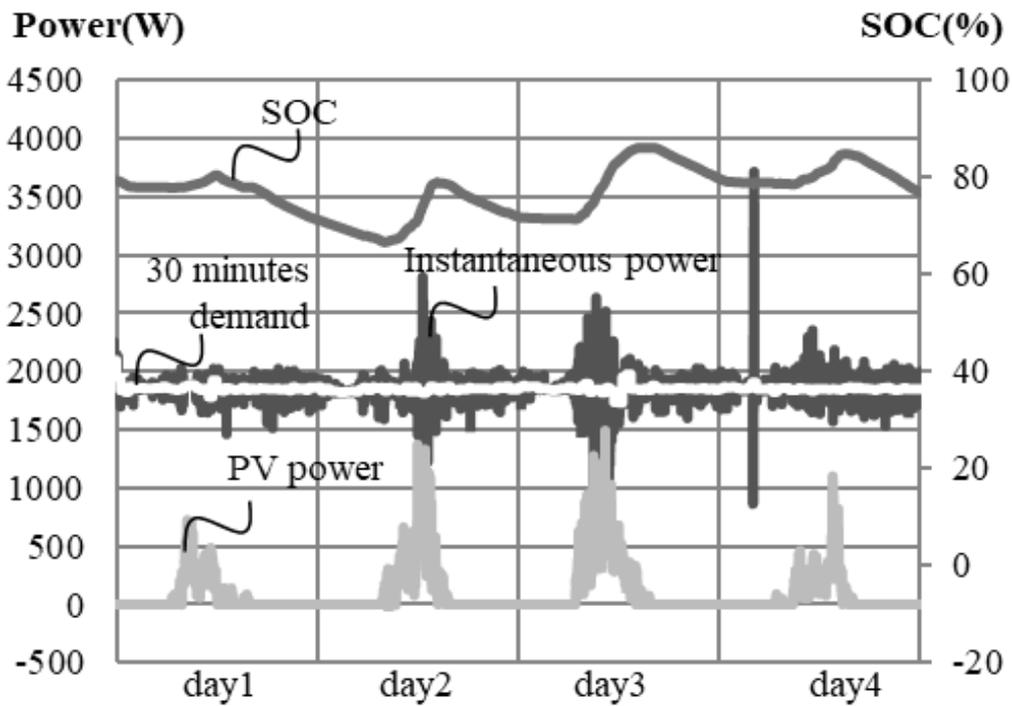


図 4.11 発電状況と SOC の推移

4.3 本章のまとめ

本章では、電力需要のピーク削減及び契約電力を抑えることによる基地局の電力コスト削減に向けて、スマートメータの情報をもとにしてリチウムイオン電池を制御する平準化制御法を提案し、グリーン基地局試験局において実証試験を行った。提案手法により一日のデマンド値の変動幅を最大約 17%まで抑制できることを確認して、契約電力を抑えることによる電気料金削減に有効な手段であることを示した。

参考文献

- [58] 阿波田宙, 谷内利明, “太陽光発電電力量予測及び電力需要予測に基づくマイクログリッドの商用電力平準化,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J101-B, No. 11, pp. 928-934, Nov. 2018.
- [59] 第 13 回スマートメータ制度検討会, “スマートメーターの導入促進に伴う課題と対応 (案),” 経済産業省, https://www.meti.go.jp/committee/summary/0004668/pdf/013_03_00.pdf, Nov. 2013.
- [60] S. Mohajeryami, M. Doostan, and A. Asadinejad, “An Investigation of the Relationship between Accuracy of Customer Baseline Calculation and Efficiency of Peak Time Rebate Program,” *Proc. 2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI'16)*, pp.1-8, Urbana, Feb. 2016.
- [61] 森田圭, 真鍋勇介, 加藤丈佳, 舟橋俊久, 鈴置保雄, “数百世帯規模の家庭の平均電力需要特性の評価,” エネルギー・資源学会論文誌, vol. 38, No.1, pp.20-29, Jan. 2017.
- [62] 灰田武史, 武藤昭一, 高橋芳雄, 石井康貴, “多年度データのトレンド処理に基づいた最大電力予測,” 電気学会論文誌 B, Vol. 117-B, No. 8, pp1101-1108, Aug. 1997.

第 5 章

整流器電圧制御による ピークカット制御法

5.1 基地局の電源システム

基地局の電源システムは、48V 系の直流電源が利用されている。これは、商用電力の交流電源から整流器が直流に変換して、負荷に直流電力を供給している。基地局の負荷装置は、40.5V～57V の範囲で電力が供給されるように設計されている。

現状では、図 5.1 に示すように、バックアップ用の蓄電池が電源と負荷の間に並列に接続されている。この接続形態は、フロート充電であり、蓄電池は常に満充電状態に保持され、停電時にバックアップとして蓄電池から負荷に電力を供給できるようになっている。

しかし、この接続形態では、電力需要のピーク時に蓄電池から電力を供給することや、図 5.2 に示すように太陽光発電を導入した場合、発電電力が余剰状態にあるときに、蓄電池に蓄電すること等の制御が不可能である。このような制御を可能にするためには、充放電を制御するための装置が必要となり、具体的には、充電するスイッチ、放電するスイッチの制御を、状況に応じて任意に柔軟に切り替えられる必要がある。

本章では、簡易な制御手段で蓄電池のピークカット制御を実現できる構成を検討する。

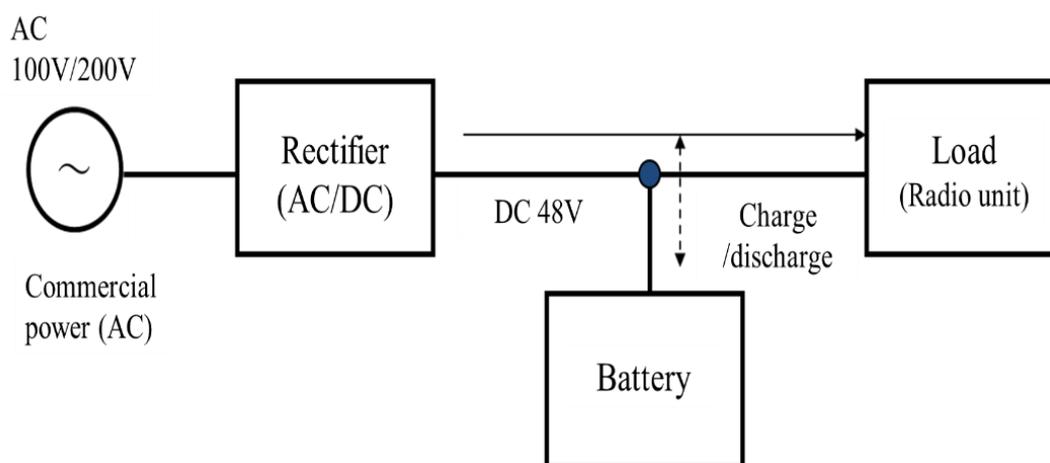


図 5.1 基地局の電力システム

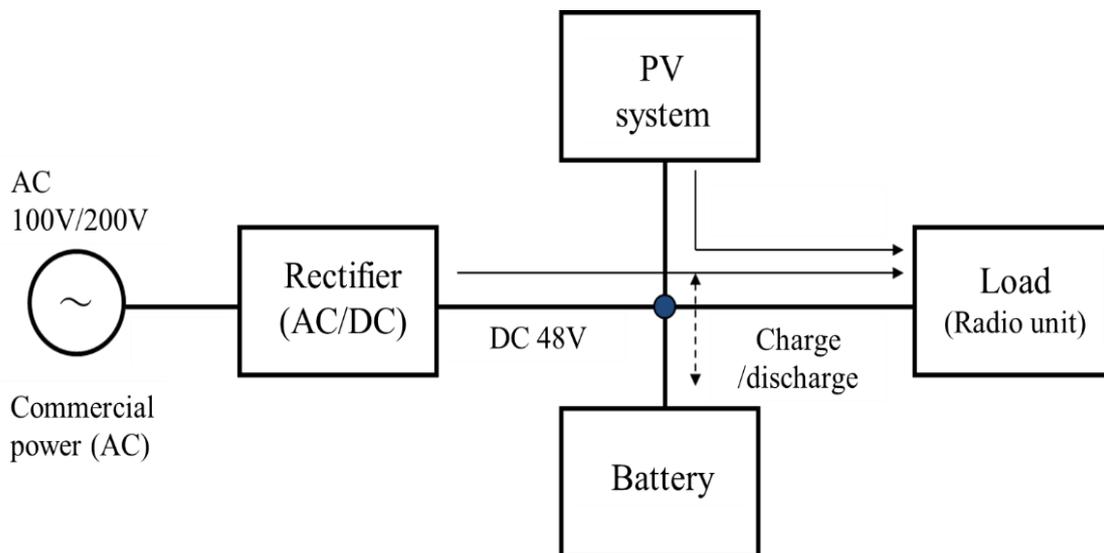


図 5.2 太陽光発電を備えた基地局

5.2 整流器電圧制御による蓄電池の充放電

蓄電池の充放電制御は電圧調整により実施されるものである。具体的には、充電する際にはバス電圧を充電制御装置で蓄電池電圧以上に昇圧し、蓄電池に電力を供給する。一方、放電する場合は、蓄電池電圧を放電制御装置でバス電圧以上に昇圧し、バスライン（無線機）に電力を供給する。

一方、蓄電池電圧に対して整流器出力電圧に起因する適切なバス電圧を印加し、充電時にはバス電圧を電池電圧以上に、放電時にはバス電圧を蓄電池電圧以下に調整することで充放電制御を行うことが可能である。本方式の充放電手法を図 5.3 に示す。

バス電圧を調整するにあたり、既存整流器が有する機能を活用する。整流器には、交流を直流に変換後、基地局の許容電圧に適した電力を出力する必要があるため、DC/DC コンバータが搭載されている。既存整流器では出力電圧は固定されているが、出力電圧を可変にすることで電力制御装置の代替として活用できる[63]。

なお、出力電圧の調整には既存整流器のハードウェア変更ではなく、ソフトウ

ウェアアップデートで実現できるため、新たなハードウェアを必要とせずに導入コストを低く抑えることができる。

図 5.2 のように太陽光発電装置を備える場合は、太陽光発電装置の出力電圧を整流器電圧や蓄電池電圧に比べ高めに設定することで、太陽光発電を優先的に無線機に供給することが可能である。

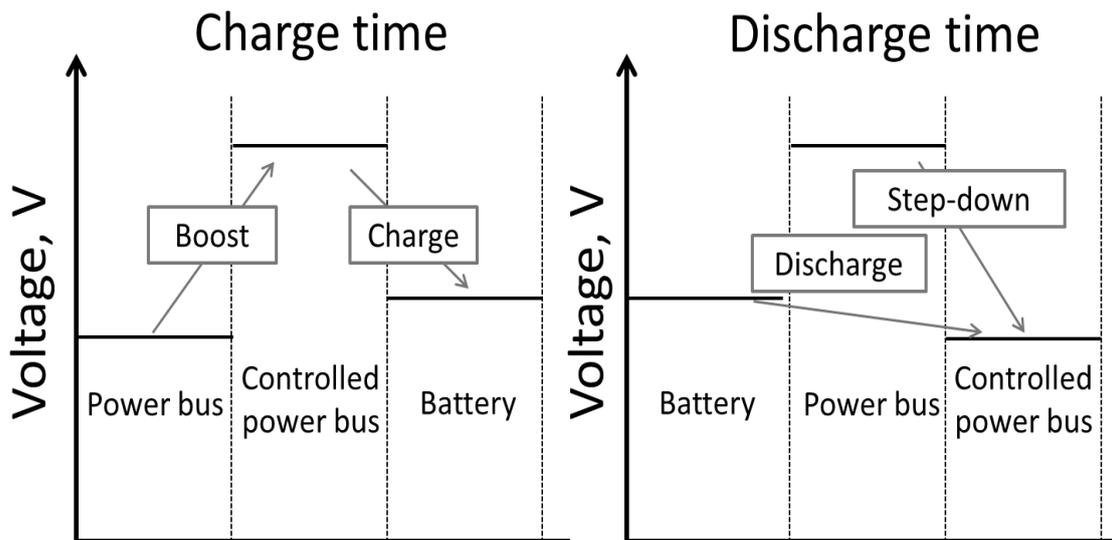


図 5.3 整流器電圧制御による蓄電池の充放電

5.3 蓄電池のピークカット制御

ピークカットにより最大消費電力を抑えることで、契約電力を抑制して電気料金削減を可能とする。図 5.4 は基地局全体の消費電力の長期測定結果である。通常は空調系負荷の変動によりピークが発生しているが、長期測定の結果、復電時の蓄電池の充電により発生するピークの方が大きく、基地局の電力変動は、復電時の蓄電池充電が支配的であることがわかった。基地局のピークカットには最大消費電力発生の要因である復電時の蓄電池充電量を抑制するような蓄電池制御方式が求められる。

蓄電池電圧は充電率によって異なる。そのため、フロート電池のように充放電制御装置を介さず、電力バスに接続されている電池の場合、電池電圧の変動（低

下) によって大きな蓄電池充電電流が流れる。充電量を一定にするためには、図 5.5 のように整流器電圧を蓄電池の充電率に応じて変更する必要がある。整流器電圧はオームの法則より式(5.1)で表すことができる。

$$V = \sqrt{P \times R} + OCV \quad (5.1)$$

ここで、 V は整流器電圧、 P は充電量、 R は抵抗（配線抵抗と電池の内部抵抗の和）、 OCV は蓄電池電圧（開回路電圧）である。

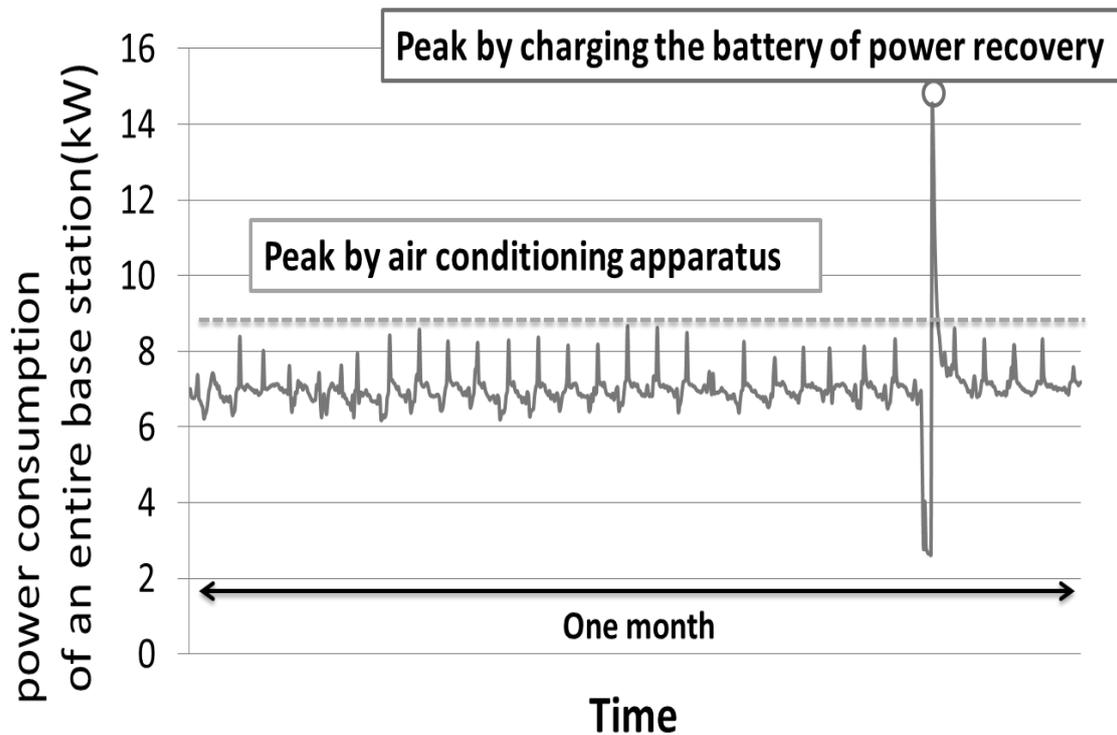


図 5.4 基地局全体の消費電力の長期測定結果

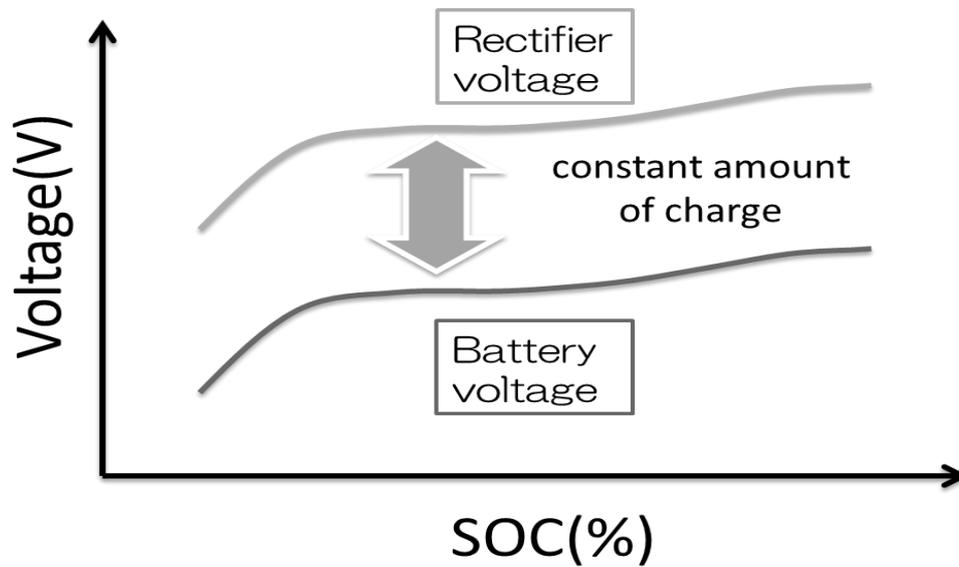


図 5.5 整流器電圧の蓄電池の充電率に応じた変更

また、蓄電池電圧と SOC の関係は、式(5.2)のように関数近似されることが知られている[64]。

$$\begin{aligned}
 OCV = K_0 - \frac{K_1}{SOC} - K_2 SOC \\
 + K_3 \ln(SOC) + K_4 \ln(1 - SOC)
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

ここで、 $K_0 \sim K_4$ は係数パラメータであり、例えば最小二乗推定法などを用いて図面データから推定できる。

式(5.1)と式(5.2)を用いることで、蓄電池の SOC 情報から充電量を一定にする整流器電圧を求めることが可能になるため、これを用いて、図 5.1 の構成で、ピークカット制御の検証を行った。

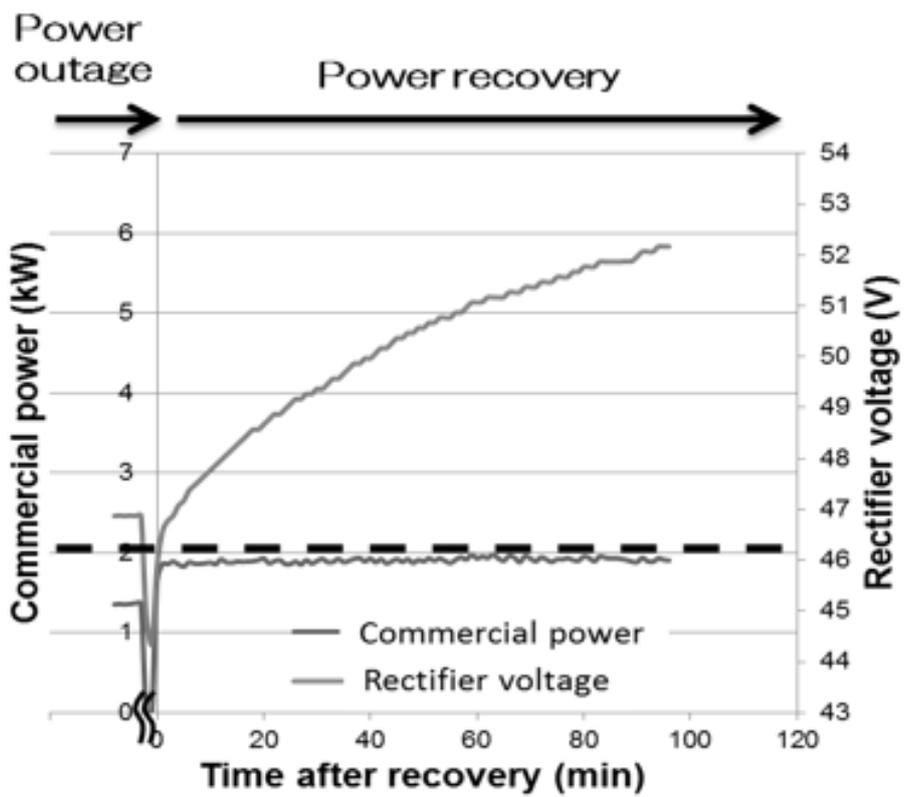
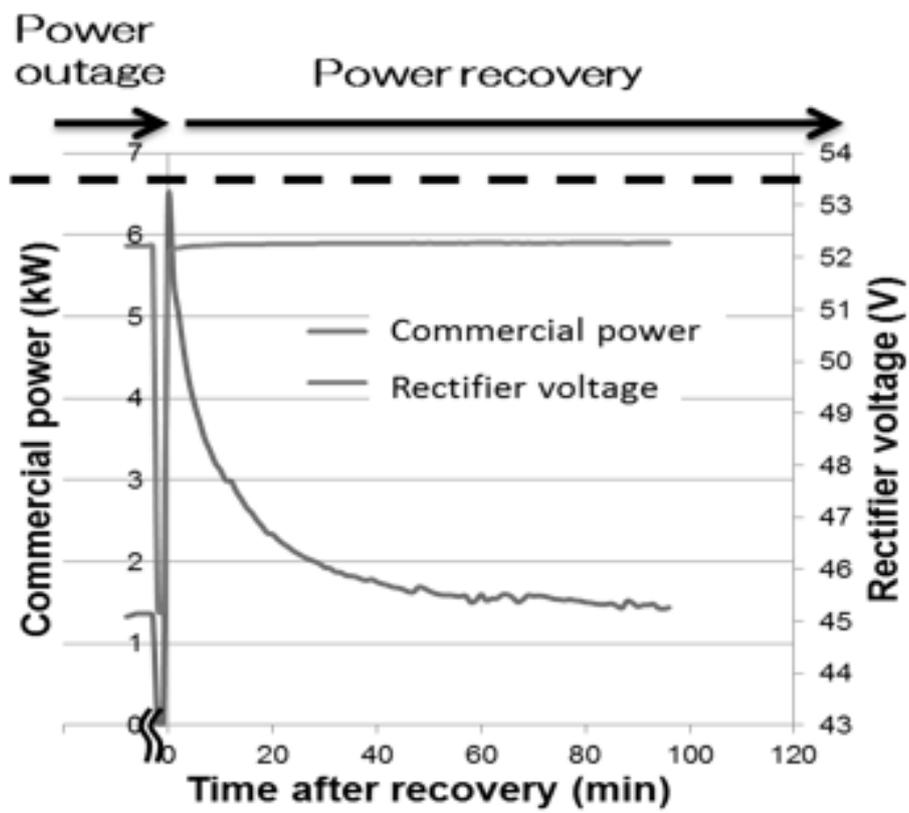


図 5.6 ピークカット制御結果(上側:制御無、下側:制御有)

試験結果を図 5.6 に示す。このとき、負荷 1.5kW、リチウムイオン電池（容量 10kWh）を用いた。整流器、負荷、リチウムイオン電池は電力バスに直結されており、一定時間、整流器の電源をオフにすることで、停電状態を再現し、リチウムイオン電池の充電率を低下させた後に、整流器をオンにすることで復電状態を再現する。図 5.6 によるとピークカット制御がない場合、復電初期に蓄電池充電による大電流が発生する。一方、制御が有る場合、整流器電圧を変更することで、充電電流を平滑化している。この結果は、ピークカット制御により最大電流を抑制し、契約電力を抑える（試験結果では 4.5kW）ことで電気料金削減が可能であることを示している。

5.4 本章のまとめ

基地局の直流電力システムにおいて、整流器の電圧制御によるピークカット制御について提案し、実機検証を行った。試験の結果、提案方式を利用した電源システムが問題なく動作し、既存の蓄電池を有効利用して、商用電力のピーク削減に有効であることを確認した。

再生可能エネルギーの導入や、電力ピークシフト等は、導入コストが大きいことが普及の課題となっている。本章で提案した方式は、既存の無線基地局に備わっている整流器や蓄電池を有効利用することで導入コストを抑えられる。太陽光発電装置の導入コストは必要となるが、それ以外は既存の設備を利用でき、普及の障害となるコストを低減できると考えている。

参考文献

- [63] 松岡保静, 中村祐喜, 山内隆史, “整流器電圧制御による無線基地局の電力制御手法,”電子情報通信学会論文誌 B, vol.J98-B, no.6, pp.451-459, Jun.2015.
- [64] G.L.Plett, “Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery pack: Part2. Modeling and identification,” Journal of Power Sources, vol.134, no.2, pp.262-276, Aug. 2004.

第 6 章

結論

6.1 総括

本研究では、「環境貢献」、「災害対策」、「省エネルギー」をめざした、グリーン基地局の電力制御の開発に向けて、「ソーラーパネル・蓄電池連携制御の開発」「天気予報連動制御の開発」「受電電力平準化制御の開発」「整流器電圧制御の開発」を行った。

ソーラーパネル・蓄電池連携制御の開発[65]

ソーラーパネルの発電電力は天候により発電不足や発電余剰状態が発生するケースが考えられる。この影響の一つとして、ソーラーパネルの発電電力の有効に使われない電力、すなわち余剰電力を損失する問題が基地局でも起きている。一方、基地局用ソーラーパネルは朝晩の発電も有効に活用するために負荷電力（通信装置の消費電力）以上の定格出力を備えることが望ましい。しかし、コストの観点からソーラーパネルを必要以上に設置することも問題であり、その最適化も必要である。

本研究では、基地局においてリチウムイオン電池やソーラーパネルを利用して、上記で問題となっているソーラーパネルの余剰電力の削減と負荷電力以上の定格出力を備えるソーラーパネル設置の最適化を両立するパワーシフト手法を提案した。

その中でリアルタイムな発電電力のデータを用いて基地局用のソーラーパネルで発生する余剰電力の充電制御を提案し、実際の基地局で検証した結果、提案方式である余剰充電制御を利用したパワーシフト制御が問題なく動作し、従来に比べて 1.48 倍の自家発電率の向上を確認した。

天気予報連動制御の開発[66]

パワーシフト制御では、非常時のバックアップ容量と通常時の充放電容量の比率を固定しているため、天候により発電不足や発電余剰状態が発生することが課題である。さらに、災害対策の観点から、停電など非常時の電源確保のためなるべく SOC を高く保つ方が望ましい。一方、余剰電力を損失することなく蓄電するためには、あらかじめ SOC を十分

低く保つことが必要となり、そのため環境貢献と災害対策が両立できない課題があった。

本研究では、基地局においてリチウムイオン電池やソーラーパネルを利用して、天気予報に連動した蓄電池の充放電制御に関する最適化手法を提案することにより、環境貢献と災害対策の両立を検討した。

その中で、ソーラーパネルの発電予測に基づくリチウムイオン電池制御を提案し、実際の基地局で検証した結果、天候別に問題なく動作し、従来のパワーシフト制御に比べて 1.29 倍の自家発電率の向上を確認した。また、停電時にもソーラーパネルとの連携動作により、従来に比べて約 1.34 倍の自立運転時間を確認した。

受電電力平準化制御の開発[67]

電力需要のピーク削減及び契約電力を抑えることによる基地局の電力コスト削減に向けて、受電電力の平準化は有効な手段と考えられる。蓄電池を備える太陽光発電システムにおいて効果的に受電電力の平準化を行う手法として、発電量と負荷の変動を予測することで、受電電力を平準化するように、蓄電池の充放電計画を作成する方法が報告されている。

本研究では、スマートメータの瞬時電力値を活用した蓄電池のフィードバック制御により、発電量や負荷の予測精度に依存しない受電電力の平準化手法について提案した。

その中で、実際の基地局で検証した結果、提案手法により一日のデマンド値の変動幅を最大約 17%まで抑制できることを確認して、契約電力を抑えることによる電気料金削減に有効な手段であることを示した。

整流器電圧制御によるピークカット制御の開発[68]

基地局の蓄電池を用いたピークカット制御を提案する。システムの設計においては、既存設備をなるべく有効利用して、新たな装置やハードウェアはなるべく追加しない方針とし、導入コストを低く抑える。提案システムでは、整流器の出力電圧を制御することによって、上記の電力制御を実現する。これは、整流器のソフトウェアアップデートで実現で

きるため、新たなハードウェアを必要とせずに実現できる手法である。

本研究では、この提案手法およびシステムについて述べ、蓄電池の充放電制御が実現できることを実機検証で明らかにした。

試験の結果、提案方式を利用した電源システムが問題なく動作し、ピークカット制御により最大電流を抑制して、商用電力のピーク削減に有効であること確認した。

再生可能エネルギーの導入や、電力ピークシフト等は、導入コストが大きいことが普及の課題となっている。本研究で提案した方式は、既存の無線基地局に備わっている整流器や蓄電池を有効利用することで導入コストを抑えられる。太陽光発電装置の導入コストは必要となるが、それ以外は既存の設備を利用でき、普及の障害となるコストを低減できると考えている。

6.2 今後の展望

本研究では、グリーン基地局の電力制御の開発を行った。今後、グリーン基地局が普及、一般化して、広域に満遍なく配置されるようになったとき、グリーン基地局群を想定した電力連携に関する研究が社会に貢献できることを期待している。

電力融通

近年、日本の2050年温室効果ガス実質排出ゼロ目標[69]の達成をめざして、需要家が直接再エネ調達に参画できるオフサイト型PPA（Power Purchase Agreement）を可能とする環境整備が進められている[70]。オフサイト型PPAとは、自社事業所の屋根等に太陽光パネルを設置して再エネ電力を調達するオンサイト型PPAと異なり、遠隔地にある発電設備から自己託送制度を利用して直接調達する仕組みである。

グリーン基地局を用いた電力融通の実機検証はこのような仕組みを用いて実施していくものと想定される。

デマンドレスポンス

2021年に需給調整市場が開設され、既存の卸市場・電源I'市場に加えて、アグリゲーションビジネスの領域は広がりを見せている[71]。

一般送配電事業者では、これまで自らが周波数維持義務を果たすために必要な調整力をエリア内で確保するため、2016年10月より調整力公募を実施しているが、この調整力をエリアを越えて低廉且つ安定的に確保すべく調整力の広域的な調達を行うための市場が需給調整市場である。

需給調整市場は前日の入札など短期的なDRの取引を行う市場となっており、中長期的な設備の確保を必要としないことから、比較的参入が容易な市場と想定される。

電気自動車との連携

昨今、電気自動車や燃料電池自動車などの電動車を含む分散型電源の活用による災害時のレジリエンス向上の期待が高まっており[72]、今後は災害対策の一環として電気自動車による無線基地局への電力供給技術の確立が必要となってくる[73]。

NTTグループでは国際イニシアティブ「EV100」に加盟しており、NTTグループが保有している一般車両約1.1万台について、2025年までに「50%EV化」、2030年までに「100%EV化」をめざしている[1]。

今後は災害対策だけではなく、環境貢献や地域社会への貢献に向けて、グリーン基地局と電気自動車の連携方法について検討していきたい。

参考文献

- [65] 中村祐喜, 竹野和彦, “グリーン基地局によるソーラーパネル・蓄電池連携の最適パワー制御法,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J100-B, no.4, pp.307-314, Apr.2017.
- [66] 中村祐喜, 竹野和彦, “グリーン基地局における天気予報連動によるリチウムイオン電池最適制御法,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J101-B, no.11, pp.935-941, Nov.2018.

- [67] 中村祐喜, 竹野和彦, 庄山正仁, “グリーン基地局における受電電力平準化のためのリチウムイオン電池最適制御法,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J104-B, no.6, pp.520-526, Jun.2021.
- [68] M. Nakamura, K. Kimura, and K. Takeno, “Peak-cut control of smart energy BTS: Power control technology for reducing the power consumed by base stations,” *Proc. 37th International Communications Energy Conference (INTELEC'15)*, DOI: 10.1109/INTLEC.2015.7572448, Oct.2015.
- [69] 首相官邸, “第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説,” https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html, Oct. 2020.
- [70] 電力・ガス基本政策小委員会, “再エネ導入拡大に向けた事業環境整備について,” 経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/031_04_00.pdf, Mar.2021.
- [71] 第13回ERAB検討会, “アグリゲーションビジネスの活性化に向けた取り組み,” 経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/energy_resource/pdf/013_03_01.pdf, Oct.2020.
- [72] 電動車活用社会推進協議会, “災害時における電動車の活用促進マニュアル,” 経済産業省・国土交通省, <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001351384.pdf>, Jul.2020.
- [73] 川野想一郎, 久光椋大, 庄山正仁, 野下裕市, 中村祐喜, 竹野和彦, “双方向電力伝送が可能なCLLC方式共振形コンバータ” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.121, no.40, EE2021-5, pp.25-30, May.2021.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方々のご指導とご支援をいただきました。

九州大学大学院システム情報科学研究院庄山正仁教授には、本論文をまとめるにあたり、全体にわたって多大なる的確かつ温かいご指導とご鞭撻をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

株式会社NTTドコモクロステック開発部竹野和彦博士には、筆者が九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程で本論文をまとめることをスタートするにあたって、研究の機会を与えていただくとともに、全体の方針や進め方に関して、的確かつ温かいご指導とご鞭撻をいただきました。心より感謝の意を表します。

九州大学大学院システム情報科学研究院吉田敬教授には、本論文をまとめるにあたり、有益かつ貴重なご指導とご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

また、九州大学大学院システム情報科学研究院岩熊成卓教授には、終始有益なご指導とご助言をいただきました。深く御礼申し上げます。

本論文は筆者が勤務している株式会社NTTドコモにおいて取り組んだ、グリーン基地局の電力制御に関する各種研究開発の成果をまとめたもので、本研究を進めるにあたり多くの方々にご協力・ご支援・ご助言をいただきました。

ソーラーパネル・蓄電池連携制御の研究においては、パナソニックシステムソリューションズジャパン株式会社大友康宏氏（当時NTTドコモ）には、システムの実装段階において、多くのご討論とご支援をいただきました。また、天気予報連動制御の研究および受電電力平準化制御の研究においては、パナソニックシステムソリューションズジャパン株式会社木村和明氏（当時NTTドコモ）には、システムの実装段階において、多大なご討論とご支援をいただきました。整流器電圧制御の研究においては、NTTドコモ松岡保静博士には、多大なご指導とご助言をいただきました。さらに、坂本俊悟氏（九州大学 卒業）、久光椋大氏（九州大学 卒業）、九州大学河野誠司氏には、第6章の今後の展望に記載の電力融通や電気自動車との連携に向けた研究について、多くのご指導やご討論をいただきました。これら研究の機会を与えていただいた方々、多大なるご指導やご討論をいただいた方々に心より感謝の意を表します。

ここに記しきれない多くの方々のご支援を得て、本論文をまとめることができました。ここに深く感謝の意を表すとともに、厚く御礼を申し上げます。