

IoT デバイス向け非常用燃料電池の遠隔監視・制御技術の開発

代表研究者

秋元 祐太郎

筑波大学 システム情報系 助教

1 背景

近年、モノの IoT 化が進んでいる。例えば、クルマの IoT 化により信号や街路灯から提供されるスポット情報から精緻な混雑回避が可能になるなど利用者の利便性の向上が期待されている。その IoT 機器は系統電力で動作させていることがほとんどである。しかし、系統電力は災害時に供給が一時的に停止してしまう。今後、IoT による情報発信、共有が進んでいくと災害時に情報提供がなされないためパニックが生じることやプログラムの誤作動などさまざまな懸念がある。災害時、基地局においては太陽光発電や蓄電池の導入により停電を回避している。例えば NTT ドコモなどでは太陽光発電と蓄電池を導入しており、昼間の電力は太陽光発電で賄い、災害が夜に発生した場合には蓄電池による電力供給を想定している。また、2017 年からメタノールを燃料とした 1 kW 燃料電池の実証試験を行っている¹⁾。一方、数 W 程度の通信機器向け燃料電池システムは研究されていない。今後は小さなデバイスである IoT 機器も機能維持のため、停電を回避し動作し続けることが重要である。

研究代表者は、2018 年度電気通信普及財団 研究調査助成、「パッシブ燃料電池を用いた IoT 向け電源システムの開発」を行った。IoT デバイスの機能が数 W と低電力な点に着目し、空気供給用ポンプや冷却用ファンなど補器類が不要なパッシブ燃料電池を採用した非常用電源を開発し、非常用電源のメンテナンスフリー化を実現した。このシステムと蓄電池との比較評価を電気学会全国大会にて発表し、それをもとに投稿した論文が掲載される²⁾など学術的にも高く評価された。今後、広範なエリア、分野への IoT デバイスの普及が想定され、これらに開発した非常用電源システムを搭載するためには、電源システムの信頼性向上、つまり、安定稼働が行われる必要がある。

そこで、燃料電池の稼働状況を瞬時に把握し、動作を安定に保つ遠隔診断・制御システムを開発する。具体的にはこれまでに非破壊診断技術と理論式をもとにしたフィッティング評価による燃料電池の出力低下要因分析、制御技術³⁾を応用し、遠隔監視技術および出力要因分析に基づく自動制御技術を開発する。これによって非常用燃料電池電源システムの信頼性向上に寄与し、強靱な IoT 通信網の構築に貢献する。

2 開発した計測・制御システム

図 1 に研究の全体概要図を示す。これまでに研究代表者らが開発した理論式を用いた出力低下要因分析手法を IoT デバイス向け非常用燃料電池に適用する。IoT デバイスはそれ自体の機能のほか、クラウドへのデータアップロードと燃料電池の制御を担う。

前述の 2018 年度電気通信普及財団 研究調査助成「パッシブ燃料電池を用いた IoT 向け電源システムの開発」にて、図 2 のような監視システムを開発した。IoT デバイスとして Raspberry Pi を搭載し、計測したデータをサーバにアップロードした。燃料電池は、電力監視ツール (ESP-PowerMonitor) を介して IoT デバイスに接続した。このツールでは、IoT デバイスの電圧、電流、電力を測定し、Microsoft Azure にデータをアップロードした。一方で、制御のためにはセル電圧と温度の監視とそれを分析しフィードバックすることが重要である。また、Wifi 環境がないところでも動作できることが望ましい。そこで、本研究では燃料電池のセル電圧および電圧に変換された温度を計測し、クラウド上にアップロードシステムを開発した。Android スマートフォンを使ったシステムを採用し、GPIO ボードでの計測とスマートフォンによるクラウドへのデータ送信、研究室内での PC における監視および制御コマンドの送付などのシステムを構築した。

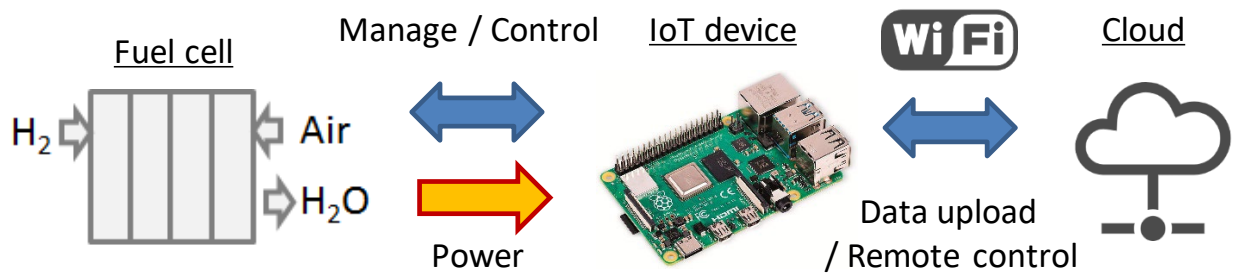


図1 研究概要図

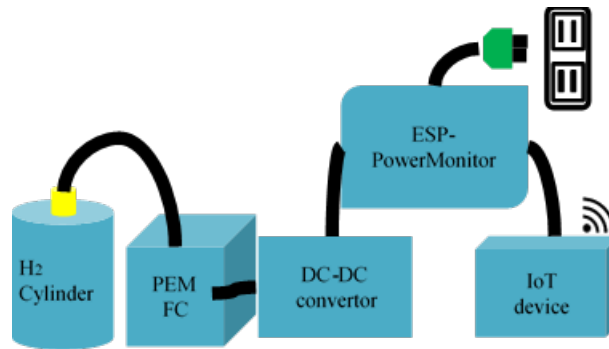


図2 2018年度に作成したシステム概要図

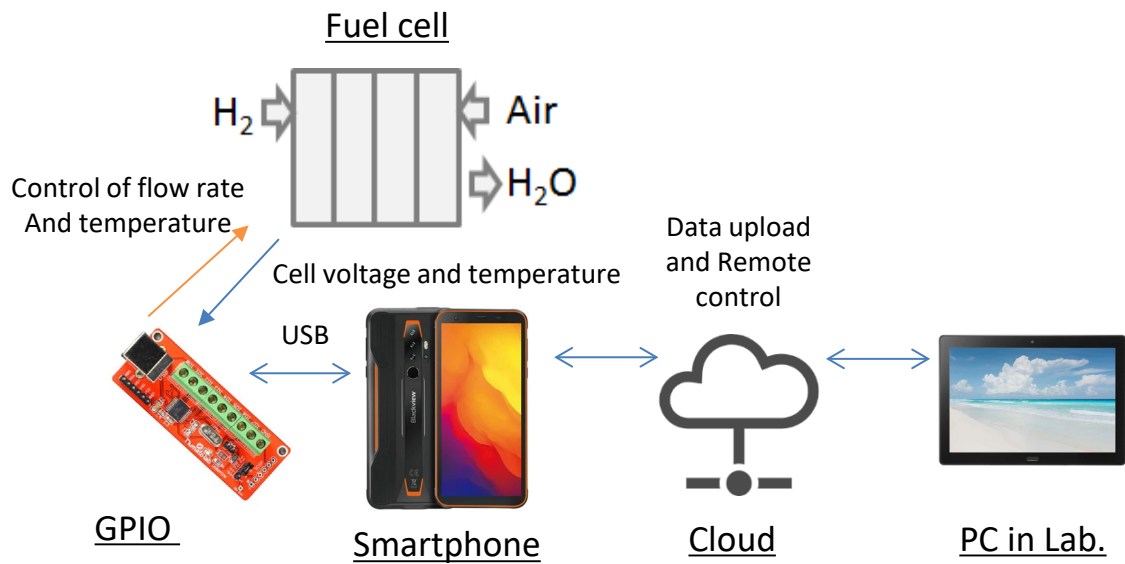


図3 今回開発したシステム概要図

3 制御方法

本研究では予防制御手法を採用する。この手法では燃料電池内に水が滞留するフラiddiingや膜の乾燥などによって生じるドライアウトといった故障を察知し、事前に制御することで電力を維持する方法である。本研究では、抵抗分極を制御指標とする予防制御手法を提案する。分極とは、電流密度の増加に伴う電圧降下のことである。電力を低下させる要因によって、活性化分極、抵抗分極、濃度分極の3種類に分類される。活性化分極は、活性化エネルギーが消費され、イオンになる反応による電圧降下である。抵抗分極は、燃料電池を構成する電解質膜、電極、セパレータなどの電子やイオンの移動に対する抵抗に起因する電圧降下である。濃度分極とは、酸素や水素の濃度が低下することによって生じる電圧降下のことである。

出力低下率を評価するために、燃料電池から得られるセル電圧、スタック電流、スタック温度の測定値に基づいて、最小二乗法でカーブモデル式をフィッティングし、抵抗分極を算出した。本研究では、式(1)の曲線モデル式⁴⁾を用いて、オーバーポテンシャルを算出した。

$$V = E_0(T) - \eta_{act}(T) - \eta_{ohmic}(T) - \eta_{con}(T) \quad (1)$$

V [V]はセル電圧、 $E_0(T)$ [V]は理論電圧、 $\eta_{act}(T)$ [V]は活性化分極、 $\eta_{ohmic}(T)$ [V]は抵抗分極、 $\eta_{con}(T)$ [V]は濃度分極である。本手法では1秒ごとに更新される運転時のセル電圧とスタック温度をフィッティングに用い、IV曲線を予測し、各抵抗分極を算出する。これらの分極は、1秒ごとの燃料電池スタックの測定値を用いて、図3のPCで計算される。曲線モデルに関する先行研究では、いくつかの式が提案されており、最もシンプルなものはKimら⁵⁾である。Squadritoら⁶⁾は、急峻な電圧に対応するため、濃度分極項の係数として電流密度を用いた式を提案している。しかし、これらは温度と湿度が一定であることを前提としているのに対し、ここで採用した曲線モデル式⁴⁾は、すべての分極について温度を変数として用いている。したがって、燃料電池の温度は動作段階で変化するため、実際のシステム実装に適切であると考えられる。

4 結果と考察

図4は、今回開発したシステムにおける予防制御手法と先行研究での故障制御におけるセル4電圧の推移を示したものである。このスタックでは、Cell 4でフラiddiingが検出されることが多かった。フラiddiingは、故障制御法ではセル電圧0.25V付近で検出されるが、予防制御法ではセル電圧0.45V付近で検出され、セル電圧の低下を抑制している。予防制御法における1400秒から1500秒までの水素と空気の流量、電圧と濃度分極を比較すると、1400秒から、セル電圧の低下とともに濃度分極が上昇し、1448秒に制御閾値に到達した。セル電圧が上昇(0.602V)し、濃度分極が低下した時点で、1449秒と1457秒に制御を停止した。表1に各制御手法の効率などを示す。制御回数は予防制御法が54回と先行研究の故障制御法6回に比べ多かったが、故障制御法に比べてスタック出力が高く、水素消費量が少ない。また、制御効率は、故障制御法が25.1%であったのに対し、予防制御法は26.5%と1.4%高くなった。これらの結果から、提案手法は、濃度分極を制御指標として、故障制御手法よりも早期にフラiddiingを検出することができる。したがって、平均的な出力が得られるという利点がある。また、従来のページ制御とは異なり、流量を徐々に増加させることで水素の消費を抑えることができるため、電力効率を上げながら運転することが可能であった。

図5は、予防制御法における全セルの電圧と温度推移を示したものである。すべてのセルは1100秒まで0.35Vの電圧で維持された。表2は、提案手法の制御回数である。この実験では、ドライアウトが7回、フラiddiingが3回検出された。図6は、400秒から1000秒まで温度とドライアウトを制御した場合のCell 2の電圧と抵抗分極を示したもので、ドライアウトは539秒から650秒、758秒から816秒、860秒から927秒の3回検出された。この実験のCell 2の初期抵抗分極は0.137Vだった。400秒から539秒まで温度が上昇すると、セル電圧は0.438から0.372Vに低下し、抵抗分極は0.164から0.220Vに上昇した。539秒から650秒までは、ファンを制御してセル電圧の減少を抑制した。この挙動は813秒から927秒まで顕著で、813秒から860秒までは温度が62.2°Cから67.7°Cに上昇し、セル電圧は0.425から0.392Vに低下し、抵抗分極は0.194から0.210Vに上昇した。860秒から927秒まではファン制御によりCell電圧が0.440Vに上昇し、抵抗分極が0.183Vに減少した。すべての時間帯で冷却ファンによる安定動作が可能であったことから、高温動作時に膜が乾燥したものと思われる。この実験では、539-650秒に初めてドライアウトが検出さ

れ、さらにファン制御では一時的な冷却が行われるため、3回目の制御である860-927秒の冷却ファンによる出力増加の原因は、制御前のスタックの内部状態の違いと考えられる。そのため、2回目の検出以降は、539-650秒の1回目の制御に比べ、スタック内に余熱が残り、膜が乾燥しやすくなっていました。さらに、758~816秒の2回目の制御後、スタック温度が早く上昇していることも、後者が膜を乾燥させていることを示す。さらに、セル5の電圧は、758秒では0.477Vであったが、冷却ファンの制御により927秒では0.512Vに上昇した。

フラッディングとドライアウトが混在する条件下で、フラッディングは濃度オーバーポテンシャル、ドライアウトは開始後と動作中の抵抗分極の差を制御指標として、フラッディングとドライアウトの両方を検出した。フラッディングではセル1の電圧が向上し、ドライアウトではセル2の電圧が向上した。その結果、1100秒まですべてのセルで0.35V以上を維持することができました。これらの結果から、提案手法は故障が進行する前に制御を開始するため、安定した運転が可能であった。今回の計測制御システムの開発により非常用燃料電池電源システムの信頼性向上に貢献できる。今後はこれらの研究成果をもとにシステムを実用化していきたい。

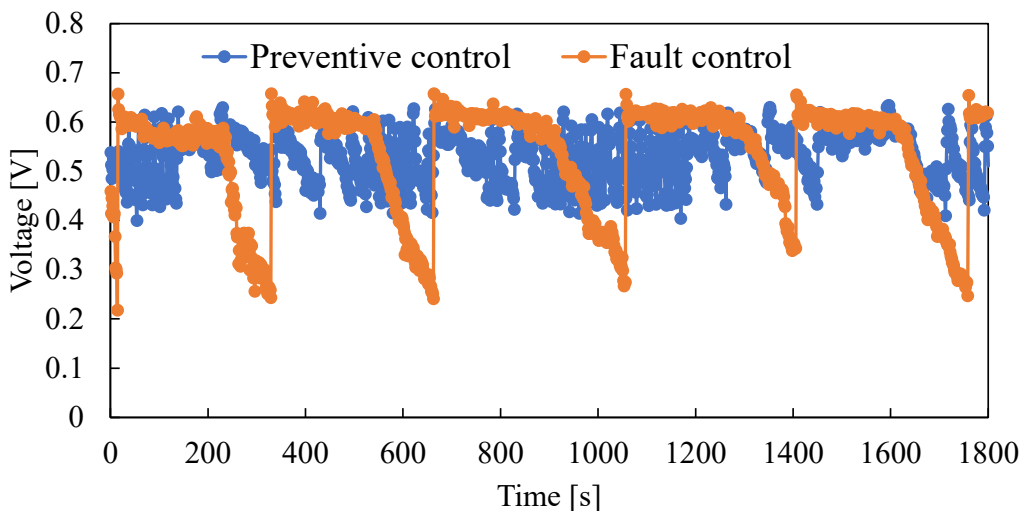


図4 低流量高温の運転条件下におけるセル電圧及び温度推移

表1 提案手法と先行研究との比較

Method	Preventive control	Fault control
Control frequency [Times]	54	6
Average power output [W]	30.7	30.1
Hydrogen consumption [L]	19.4	19.9
Efficiency [%]	26.5	25.1

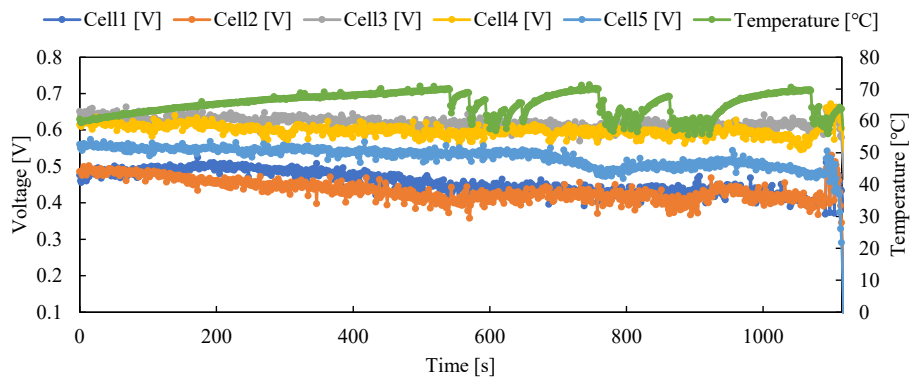
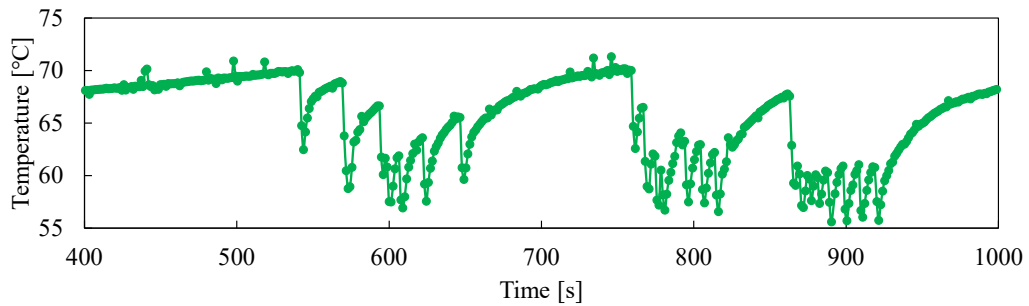
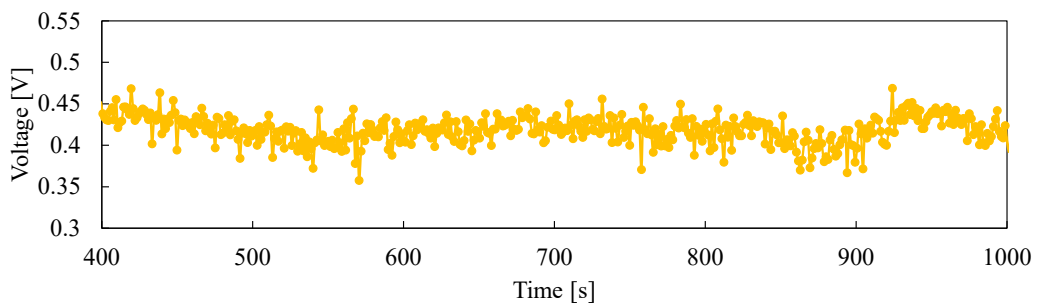


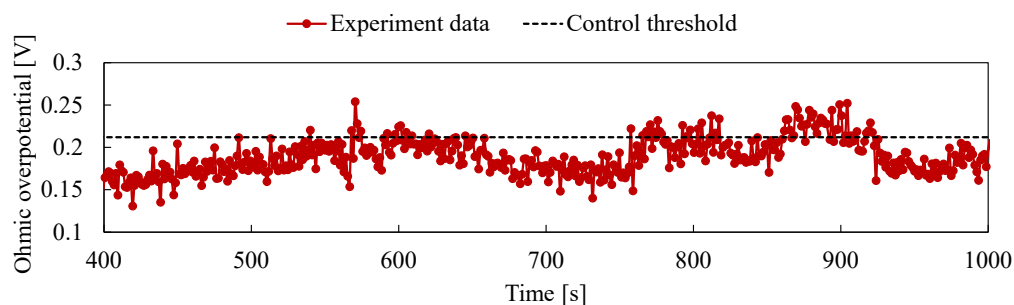
図 5 低流量高温の運転条件下におけるセル電圧及び温度推移



(a) Temperature.



(b) Cell voltage.



(c) Ohmic overpotential.

図 6 400 から 1000 秒時の計測値および計算された抵抗分極の推移

表 2 実験時のドライアウトおよびフラッシングの回数

Method	Preventive control
Control frequency of dry-out [Times]	7
Control frequency of flooding [Times]	3

【参考文献】

- 1) NTTドコモ プレスリリース, ”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”, https://www.nttdocomo.co.jp/info/news_release/2017/12/20_01.html(最終アクセス日: 2021/10/04)
- 2) Akimoto Y et al. (2020), Comparative Analysis of Fuel Cell and Battery Energy Systems for Internet of Things Devices, *Energy Reports*, 6, 29-35.
- 3) Akimoto Y, Okajima K (2021) Simple on-board fault-detection method for proton exchange membrane fuel cell stacks using by semi-empirical curve fitting. *Appl Energy* 303: 17654.
- 4) Akimoto Y, Okajima K (2014) Semi-empirical equation of PEMFC considering operation temperature. *Energy Technol Policy* 1: 91–96.
- 5) Kim J, Lee M, Srinivasan S, et al. (1995) Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation. *J Electrochem Soc* 142: 2670–2674.
- 6) Squadrito G, Maggio G, Passalacqua E, et al. (1999) An empirical equation for polymer electrolyte fuel cell (PEFC) behaviour. *J Appl Electrochem* 29: 1449–1455.