

研究解説

通信システムとエネルギー機器の 複合的挙動の参照モデル構築の試み

Prototyping reference model for combined behavior of ICT systems and energy equipment

今中 政輝*・石田 慶樹*・**・馬場 博幸*・広橋 亘***
Masaki IMANAKA, Yoshiki ISHIDA, Hiroyuki BABA and Wataru HIROHASHI

要 旨

電力部門の脱炭素化に向けて太陽光発電や風力発電などを大量に導入するため、新たな調整力の供給手段としての電気自動車や蓄電池などの分散エネルギー資源（DER）の活用が注目されている。DERは今後インターネット等を経由して制御されると考えられるが、その通信過程とDERそのものの複合的挙動を様々な分野の人々が議論できる平易なモデルは少ない。本研究では、そうした複合的挙動の構造を記述し、応答時間や応動時間を通信遅延・処理時間とDERそのものの応動時間から整理する初歩的な参照モデルとしてモデル0を構築した。本稿では、モデル0の概要とローカル接続・クラウド接続のDERへの適用例について紹介する。

Abstract

Distributed energy resources (DERs), such as electric vehicles and batteries have been focused for new flexibility resources to realize massive integration of photovoltaic power and wind power. DERs are expected to be controlled via the Internet, etc., but there are few simple models that can discuss complex behavior of both the communication process and DER itself. In this study, we constructed Model 0 as a rudimentary reference model that describes the structure of such complex behavior with delays. This paper explains an overview of Model 0 and examples of describing DERs with local connection and with cloud connection.

1. はじめに

電力部門の脱炭素化に向けて、太陽光発電（Photovoltaic power generation: PV）や風力発電などの出力が変動する再生可能エネルギー（Variable Renewable Energy: VRE）の大量導入が進められている。VREの導入拡大と、それに伴う火力発電の減少を進める上では、これまで主に火力発電が担ってきた電力システムの需給バランスを維持するための調整力を、他の手段で供給することが求められる。そこで、電気自動車（EV）や蓄電池などの分散エネルギー資源（Distributed Energy Resources: DER）の活用が注目されている。

調整力は、様々な時間スケールのものが求められる。例えば、日本では2022年から2024年にかけて需給調整市場

が相次いで創設され、需給調整市場の商品の要件として定義されている¹⁾一次調整力から三次調整力²⁾まで異なる時間スケールの5つの調整力が順次調達される。加えて、年間のピーク需要に対応する電源を確保するための容量市場も開設されている。また広義には、卸電力市場において、例えば蓄電池が、供給力が豊富で卸市場価格の安価な時間に電力を充電し、高価な時間に放電することも、DERによる調整力供給の一形態と考えられるだろう。こうしたDERを直接的に制御する主体はリソースアグリゲータ（Resource Aggregator: RA）と呼ばれる。

RAがDERに調整力を提供させる場合には、定められた時間に必要な量を供給することが求められることが多い。その実現には、RAが指令を发出してから機器が実際に所定の電力を消費するまでの時間が問題となる。本稿ではそれを応動時間と定義する。特に、RAが小規模多数台のDERを制御する場合には、インターネット等を経由して安価に制御することが求められる。しかし、インターネット上では様々な遅延があり、モニタリングや制御に用いる

*東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門

**株式会社 JPIX

***早稲田大学スマート社会技術融合研究機構先進グリッド技術研究所

サーバーなどには処理時間が存在する。加えて、機器そのものが指令を受けつけてから実際に消費電力が変化するまでの時間にも、機器や条件により大きなばらつきがある。

こうした通信系と機器の複合的な挙動を理解する上では、後述するように通信の専門家だけでなく電力システムや電気機器の技術者、ビジネスセクターの担当者など、様々な分野の人々が集まって議論する必要があるが、それを実現するためには解決しなければならない多くの課題がある。異なる分野間では前提として持つ知識や用語も異なることになるが、これまでDERの通信システムを含めた様々なDERの挙動を共通の土台で議論できるモデルはこれまで見られなかった。

本研究では、RAがDERをインターネット経由で制御する状況を想定し、通信システムとエネルギー機器の複合的な挙動を記述して、ICT的な応答時間と応動時間の分析するための初歩的なモデル(モデル0)を提案する。モデル0は、RAシステムからDERに至るまでの相互接続の構造を把握した上で、各要素における時間の経過を情報通信技術(ICT)に起因する通信遅延・処理時間、およびDERそのものの応動時間から整理するものである。本稿ではモデル0とその検討プロセス・諸前提を紹介するとともに、モデル0によりローカル接続・クラウド接続のDERの記述を例示した上で、さらに応答特性・応動特性を実測した例も紹介する。なお、モデル0という名称は、DERを中心とした系全体の分析や議論が進むにつれて、より詳細にモデル化が可能になるであろうとの前提の元で、そのたたき台のためのバージョン0という意味合いで名付けている。

モデル0の構築にあたっては、技術者でない人も含め、分野の異なる人たちが共通のモデルで話し合えるという意味での有用性を重視した。モデルの記述や分割の仕方、形式的な意味での厳密な整合性よりも、直感的な理解しやすさを重視した点にご留意いただきたい。

2. 検討のプロセスとコンセプト

モデル0は、需要側電力システム研究会のReference Model Working Group (RMWG)によって議論されている。需要側電力システム研究会は、東京大学生産技術研究所の馬場博幸研究室がコーディネートしている研究会で、約40社が参加している。その目的は、DERの活用による柔軟性の確保を行う上での、多様な通信方式への対応のためのコスト負担や責任分界点を明確化しにくいといった課題を認識し、解決策に求める技術的内容や、運用手順、コスト低減方策、EV充電の在り方などを議論し、新しい“需要側電力システム”を構築することである。

RMWGは其中で、DERの応答時間・応動時間を中心とした技術的な論点を研究するWGである。2022年9月以降、概ね毎月オンラインを中心に打ち合わせを行ってきた。

RMWGの目的は、様々な応答特性・応動特性が求められるDERについて、その複合的な挙動を議論するための共通の土台となるモデルを構築することである。DERの応答時間・応動時間などに関する明確な定義に基づき、求められるDERのスペックを議論し、DERの制御方法を決めるのに役立つことが期待されている。また、将来的にはこうしたモデルに基づき、多数台のDERがバラつきを持ちながら動作した場合の全体の挙動をシミュレーションする上でも役立つことも期待される。

しかし、インターネットなどの通信を利用してDERを制御することを想定した場合、通信、クラウドなどのサーバー、電力システム、さらには個々の蓄電池などの分散電源というように、異なる分野に関係する当事者が多数存在する。当事者によってそれぞれの立場に基づく視点が異なり、また使っている用語や定義も統一されていない。モデル0やその発展形となるモデルを用いて明示あるいは明文化することにより、相違点を明らかにし、議論の土台の統一を図る。現状においては、通信の専門家から見た視点

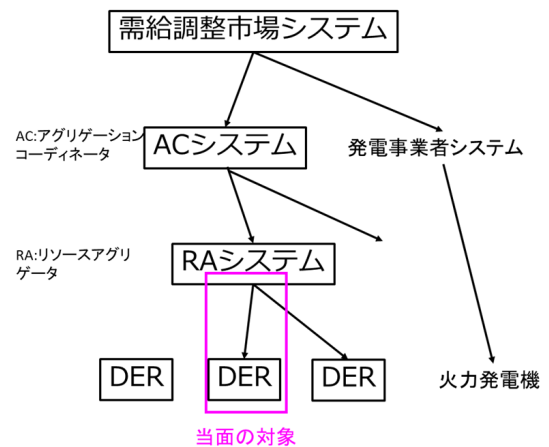


図1 複合的挙動の検討対象範囲

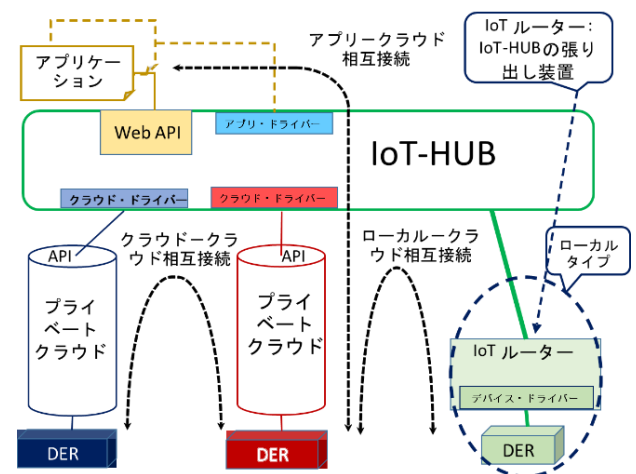


図2 IoT-HUBの概略

と、電力の専門家から見た視点、調達する側か調整力を提供する側、機器を提供する側かでも、用語や定義の統一ができていない。そこで具体的な活動として RMWG では、そうした差異を認識し、解きほぐしながら議論を進めるよう心がけている。

なお、モデル 0 が詳述するのは RA から DER までの範囲のみである。実際には、例えば需給調整市場では、図 1 のように一般送配電事業者の需給調整市場システムからアグリゲーションコーディネータ (AC) のシステム、RA システム、DER と流れていく。この全体の応動時間がリクワイヤメントを満たす必要がある。そのため、RA システムから DER の間の応動時間は需給調整市場全体のリクワイヤメントの応動時間よりも十分短い必要がある。

モデルを構築する上では、今後の相互接続の基盤となるインフラとして、IoT-HUB²⁾ を用いた接続の記述にも力点を置いている。図 2 に IoT-HUB の概略を示す。IoT-HUB は、メーカー等のプライベートクラウドを介して接続する機器も、ローカルなネットワークにしか接続できない機器も、同様の枠組みでのアプリケーションとの相互接続を可能にする。DER ごとにドライバーという小さなプログラムを作成し、プロトコルなどの差異を吸収することにより、容易な相互接続を実現している。

3. 応答時間・応動時間・ユースケース

3.1 応答時間と応動時間の定義

図 3 の応答時間と応動時間の定義を示す。応答時間は、「RA が指令を発出してから、ICT 的な返答が返るまでの時間」と定義する。

他方、応動時間は「RA が指令を発出してから、DER の消費電力が制御目標値に到達するまでの時間」と定義する。具体的には、消費電力の変化量が変化目標値の 95% に最初に到達するまでの時間とした。図 3 から、応動時間は

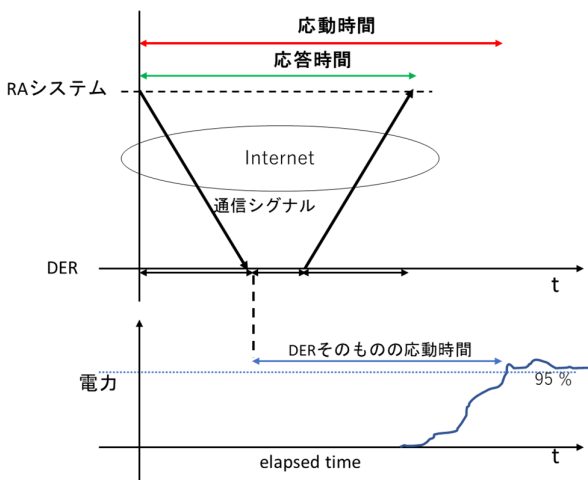


図 3 応答時間と応動時間の定義

RA から DER までの信号伝送にかかる時間と、DER そのものが信号を受けてから消費電力が変化するまでの時間 (DER そのものの応動時間) の和で表されることが分かる。

3.2 ユースケースと機器そのものの応動時間

DER からの調整力提供のユースケースは多岐にわたるが、これらを本節では DER に求められる応動時間に着目して、大きく超高速・高速・低速の 3 つに区分する。表 1 に一覧を示す。なお、区分に用いた応動時間は一つの目安である。

超高速のユースケースは典型的には求められる応動時間が数秒未満である。この領域は基本的には自端情報に基づいて DER 自ら、ないしは同一 LAN (Local Area Network) 内の制御機器が制御を行う。本稿では RA システムからの機器の通信による制御を主眼に置くので、超高速のユースケースは主たる検討の対象外である。

高速のユースケースは典型的には求められる応動時間が数秒から数十秒のオーダーである。需給調整市場では、二次調整力①が典型的である。英語でも Fast ADR (Automatic Demand Response) という単語がさす時間領域は明確ではないが、この領域を指す場合も少なくない。

また、より長いコマ幅の制御でも、高精度の制御の実現には高速の応動特性が求められる。例えば、事業所内での契約電力上限の回避というユースケースを考えると、対象コマ自体は 30 分であるが、契約電力の上限をギリギリ超えないように限られた容量の蓄電池を制御する場合には、数十秒単位での機器制御も求められる。この点は低速に分類した二次調整力②や三次調整力①でも同様である。

調整力提供に関わる多くのユースケースは、求められる応動時間が分単位、ないしそれ以上の低速のユースケースである。低速のケースでは、通信手段として LPWA (Low Power Wide Area-Network) など通信量や頻度が限られる安価な通信網の活用が期待されている。

他方、DER の機器そのものの応動時間にも大きな幅があり、それによって可能となる全体の応動時間、ひいては

表 1 超高速・高速・低速のユースケースの例

超高速 (応動時間： 数秒未満)	高速 (応動時間： 数秒～数十秒)	低速 (応動時間： 数分以上)
一次調整力	二次調整力①	二次調整力②
事故時の対応 (UPS など)	マイクログリッド内 制御	三次調整力
	精度の高い DER 間持ち替え・ コマ内調整	エネルギー市場 (スポット・ 時間前市場)
		容量市場
		再エネ余剰電力消費
		(通常の) 状態監視

表2 DERと火力発電機の起動時間と消費電力変化時間の例

機器	起動時間	消費電力変化時間
蓄電池	数百ミリ秒～数十秒	数十ミリ秒～数秒
EV充電器	数～数十秒	数百ミリ秒～数秒
ヒートポンプ給湯機	数分	数十秒～数分
空調機	数十秒～数分	数十秒～数分
モーター機器 (ファン・ポンプ等)	～数十秒	～数十秒
太陽光発電	数～数十秒	数～数十秒
天然ガス火力発電 (汽力)	数時間	数十秒～数分 (外部指令)
石炭火力発電 (汽力)	数～数十時間	数～数十分 (外部指令)

ユースケースが影響される。表2に代表的なDERと、比較のため火力発電機の応動時間のオーダーの例をまとめる。ただし、実際には機器の規模や用途によって大きく異なる場合がある。蓄電池やEV充電器、ファンやポンプ等に使われるモーター機器(小中規模)³⁾などが数十秒以内の起動と数秒以内での消費電力変化が可能なものが報告されているのに対し、ヒートポンプ給湯機⁴⁾やエアコン⁵⁾のように起動や消費電力制御に数分かかるものもある。

他方、既存の火力発電所は起動には典型的には数～数十時間、負荷周波数制御指令などに基づく消費電力の変化にも負荷周波数制御や経済負荷配分に対しては数十秒から数十分かかる。ただし、火力発電機は慣性に基づく制御では数秒未満、自端の周波数検知に基づくガバナフリーだと数～数十秒で追従しうる。こうしてみると、DERの機器そのものの応動時間は汽力の火力発電機よりも起動時間は速く、消費電力追従時間もより速いか同程度のものが少なくない。

4. モデル0の概要

4.1 モデル0の構造

モデル0はブロック・モジュール・アークの3つの構成要素により対象を記述する。図4にモデル0の構造の概要を示す。ブロックは複数のモジュールを内包し、外部との分界点が明確な単位であり、まとめて機能を提供する。モジュールは、ブロックを構成するある機能を実現するための比較的プリミティブな単位であり、処理時間が発生するものと発生しないものがある。ただし、後述するDER本体ハードウェアモジュールだけは、処理時間の代わりに動作時間が定義される。アークはブロック同士を接続する通信路であり、通信の遅延時間が発生する。原理的にはモジュールの処理時間・動作時間とアークの遅延時間の和として、応答時間・応動時間が記述される。

図5に典型的なブロックとモジュールを示す。これらは今後記述するシステムを増やす中で、必要に応じて順次増加・修正していくことを想定している。

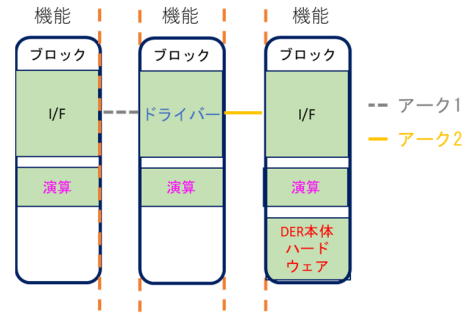


図4 モデル0の構造の概要

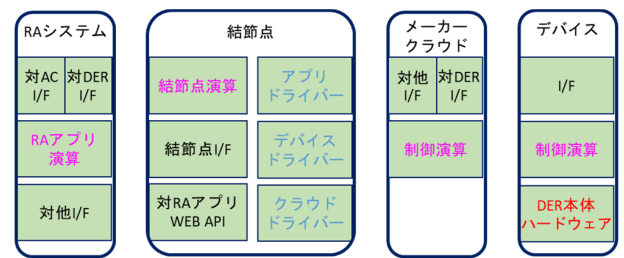


図5 ブロックとモジュールの一覧

4.2 モジュールの説明

モジュールは実際には様々な物が考えられるが、ここではそれらを以下の4つにカテゴリ化する。表3にモジュールの一覧を示す。

表3 モジュールの種類

モジュール名	処理時間・動作時間
演算モジュール	処理時間あり
I/Fモジュール	ある場合と無視できる場合
ドライバーモジュール	処理時間あり
DER本体ハードウェアモジュール	動作時間あり

I/F：インターフェイス

演算モジュールは、各ブロックの主要な機能を実現するためのデータの処理や演算を行う部分であり、処理時間がある。

インターフェイス (I/F) モジュールは、ブロック外とやり取りを行うためのモジュールである。このモジュールは様々な物が考えられ、処理時間を考慮する場合としない場合がある。

ドライバーモジュールは基本的に結節点ブロック上に置かれる、RAシステムとDERを相互接続するための機能である。RAシステムとの接合にはアプリドライバーモジュールが用いられる。ただし、RAシステムが直接WEB APIを指令する場合には、ドライバーは原則不要である。ドライバーがDERと直接接続する場合には、ベンダー依存な部分に対応する部分はデバイスドライバーモジュールとなる。DERの中にはメーカーが提供しているクラウド

に接続しそれを介して制御されるものも存在する。このようなクラウドはプライベートクラウドに分類されるものではあるが、本論では DER のメーカーによるものであることを明示するためにメーカークラウドと呼ぶことにする。DER がメーカークラウドと接続している場合には、メーカークラウドと連携するためのクラウドドライバーモジュールが用いられる。DER 本体ハードウェアモジュールは、蓄電池や EV などの本体そのものを指す。ICT 的な意味での処理時間は定義せず、代わりに信号を受けつけてから消費電力が実際に変化するまでの時間を動作時間として定義する。この動作時間は DER そのものの応動時間に含まれるものとする。

各ブロックは基本的に I/F モジュールないしドライバーモジュールを介してブロック間の接続を行う。

4.3 ブロックごとの説明

ブロックは、RA システム、結節点、メーカークラウド、デバイスの 4 つである。それぞれが複数のモジュールから構成される。

RA システムブロックは、AC システムなど上位からの指令や付随する様々な情報に基づき、各 DER への指令値と指令時間を決め、指令を出すブロックである。主なモジュールは、データの処理や保存・指令値演算などを行う RA アプリ演算モジュール、DER に向けて指令を出す対 DER I/F モジュール、AC 等からの指令を受け取る対 AC I/F モジュール、それらの他にユーザーインターフェイスや、天候情報やデマンド情報など外部の情報を受け取るための I/F モジュールがある (図 5 ではまとめて対他 I/F と表記)。

結節点ブロックは、RA システムとデバイスの相互接続を担うシステムやゲートウェイ (GW) である。IoT-HUB や PPH (Public Power HUB) は結節点となる。ただし、相互接続を担うシステムや GW のうち、メッセージ本体を変えない単純なものはアークで表現する。また、メーカー内でしか扱えない GW は除外する。結節点ブロックはクラウド上にある場合や、機器のローカルに存在する場合がある。結節点モジュールは、基本的には結節点演算モジュールと I/F モジュールからなる。他のアプリケーションからの WEB API (Application Programming Interface) を受け付ける部分を、対アプリ WEB API I/F モジュールと呼ぶ。

IoT-HUB を用いて、原則的には LAN でしか接続できない DER を相互接続する場合、同一 LAN 内に IoT ルータという装置を設置する。これも結節点ブロックの一種として扱う。なお、IoT の分野では端末と IoT 制御用のサーバーの中継をローカルに行う機器は IoT GW と呼ばれることが多いが、本稿では IoT ルータの呼称を用いる。

メーカークラウドブロックは、DER メーカー等が運用する、デバイスをモニタリング・制御するためのクラウド

である。制御演算モジュールと、対 DER I/F モジュール、その他の I/F モジュールからなる。

デバイスブロックは、物理的には EV や蓄電池といった DER 装置のひとまとまりを指す。その中心は DER 本体ハードウェアモジュールであり、電力の充放電を実際に行う機器である。そこに機器本体をモニタリング・制御する制御演算モジュールが付属する。また、外部からの指令を受け付けるための I/F モジュールがある。

4.4 アーク

アークはブロック間を接続する通信路を表現するものである。通信の遅延は基本的にアークで生じる。ただし、通信路で様々な属性を持つものは通信モジュールとして、インターフェースモジュールの一種とする。

通信に関しては通常レイヤーモデルで表現される。しかし、IoT 機器の通信においては、複数のレイヤーにまたがるような規格が存在し、また IoT 機器の制御をクラウドサービス経由で行っているなど、単純なレイヤーモデルにより表現することは困難である。その一方で、応答時間の一部を占める通信遅延は実際の通信路上でどのような手順で通信を行うかにも大きく依存する。このため、比較的単純でかつ通信遅延の変動が大きいものについては、単なるアークにより表現し、クラウドを経由するなど、複雑なものについては適宜モジュールとして切り出すこととした。ここで、アークにおける通信遅延については、モデル 0 においては、主に以下に示す 3 つのレイヤーを考慮する。

物理メディア：有線接続ではシリアル回線や光回線、無線接続では、Wi-Fi, LTE (Long Term Evolution), 5G, LPWA…などが考えられる。ここで通信速度や頻度が大きく規定される。

IoT で利用される通信プロトコル：ECHONET, ECHONET Lite, OCPP (Open Charge Point Protocol), CHAdMO (Charge de Move) など一部物理メディアも規定も包含しつつ、具体的な通信手順や通信内容も規定されており、利用する通信プロトコルによっても、通信量や通信頻度は変化する。

アプリケーションのための通信プロトコル：OSI (Open Systems Interconnection) 参照モデルでいうところのセッション層より上位層 (HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure) /HTTP /MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)…) と第 4 層 (TCP (Transmission Control Protocol) /UDP (User Datagram Protocol) /…) の選択が、通信量と通信品質に影響を与える。

なお、具体的な通信のデータ量に基づく通信時間の推定方法に関しては、例えば文献⁶⁾が参考になる。

4.5 タイミングアトリビュート

通信システムは、しばしば非同期的なふるまいをする。

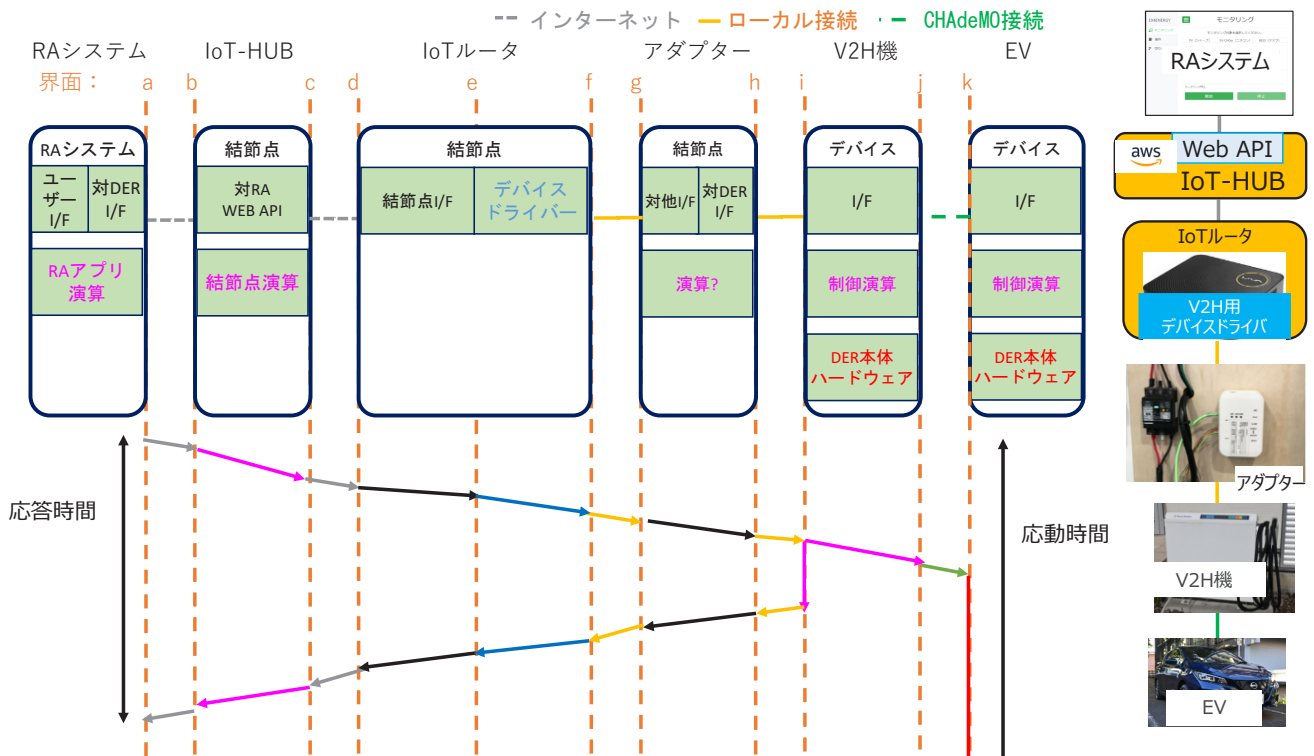


図6 ローカル接続の充電器のモデル0での記述例(左)と機器接続概略(右)

特に、アグリゲーションビジネスにおいては、例えば卸電力市場は13:00~13:30といった30分コマで取引されるように、時刻が定まった取引がベースとなる。そのため、特定の時刻にのみ情報をやり取りする特定時刻通信が重要となる。また、LPWAでは1分1回通信を行うなど、決まった間隔での通信(定間隔通信)を行うこともある。定間隔通信はさらに正時のベースがある場合(例えば13:42:00, 13:43:00..., 定時通信)とない場合(例えば13:42:38, 13:43:38..., 定期通信)に分かれる。さらに、通信が始まるまでに時間を要する場合もある(通信開始遅延)。これは定遅延や待ち行列によって表現される。これらを総称して、タイミングアトリビュートと呼ぶことにする。

システムの中に大きな遅延につながるタイミングアトリビュートがある場合には、全体の応答時間・応動時間は主にこのタイミングアトリビュートによって決定される。その場合には、この時間に比して十分小さい通信遅延や処理時間は実用上無視できる。

5. モデル0による記述例

DERのネットワークへの主な接続形態として、機器がローカルなネットワークに接続可能な場合と、メーカークラウドに接続する場合が考えられる。前者をローカル接続、後者をクラウド接続と呼ぶことにする。本章では、東京大学駒場リサーチキャンパスのCOMMAハウスにあるローカル接続のDERとクラウド接続のDERを例として、モデル

0による記述例を紹介する。両DERはIoT-HUBを介してRAシステムをイメージした試験コンソールにそれぞれ接続している。

5.1 ローカル接続のDERの記述例

ローカル接続の機器として例示するのは、ニチコン社製のEV充電器Power Stationである(以降、V2H(Vehicle to Home)機)。充電・放電時にはEVの急速充電口とケーブルで接続され、CHAdemo規格により通信することで、EVの電池の残存量(State of Charge (SOC))や充電可能量を取得できる。

このV2H機はローカルなネットワークにのみ接続する機能を持ち、直接インターネットに接続する機能はもっていないため、ローカルにIoTルータと接続することでインターネットでの通信を可能としている。図6の左側にそのモデル0による記述例、右側は機器接続の概略を示す。RAシステムブロックから、イーサネット・インターネットを経てクラウド上の結節点ブロックと接続する。その後インターネットからCOMMAハウス内のLANに戻り、そこでIoTルータブロックに接続する。その後はLANでV2H機のアダプターブロックを介してV2H機ブロックにLANで接続する。それがさらにEVブロックと充電ケーブルを介してCHAdemo規格により接続される。RAシステムとIoT-HUB、IoT-HUBとIoTルータがHTTPS上で記述されたコマンドでTCP接続であるのに対し、IoTルータ

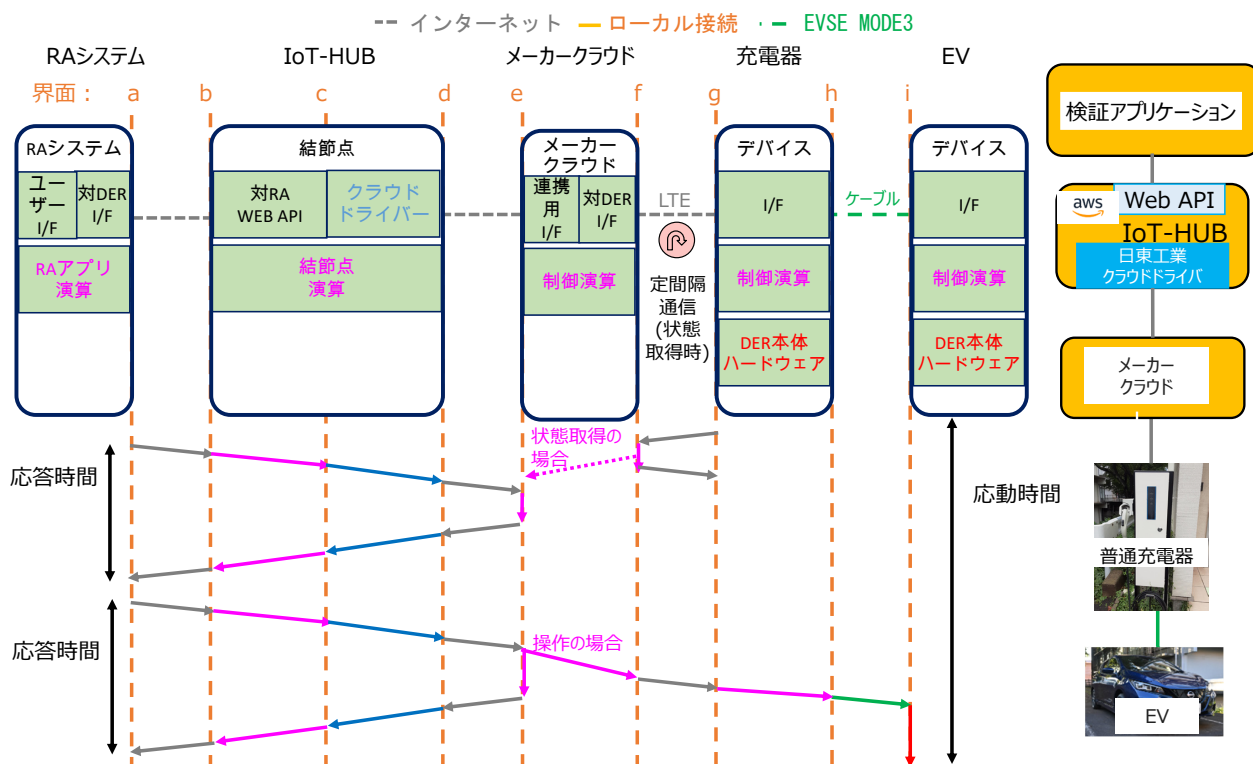


図7 クラウド接続の充電器のモデル0での記述例（左）と機器接続概略（右）

と V2H 機の間は ECHONET Lite のコマンド、UDP で接続している。

5.2 クラウド接続の DER の記述例

クラウド接続の機器の例は、日東工業社製の充電器 Pit-2G である。Pit-2G 内は LTE 回線により同社の充電器管理サーバー（メーカークラウド）と接続しており、他のサービス事業者のサーバーとクラウド間連携することによってサービスが行えるようになっている。ただし、実験に用いたのは試験用の機体であり、同社のサーバーに接続されているが、一部の仕様は製品版と異なっている。

図7の左側がそのモデル0による記述例、右側は機器接続の概略である。5.1の例と同様に、RA システムブロックから、イーサネット・インターネットを経てクラウド上の IoT-HUB ブロックに行く。IoT-HUB ブロック上のクラウドドライバーから、クラウド間接続を経て、メーカークラウドと接続する。そこから LTE 通信により充電器ブロックに接続する。充電器と EV は普通充電の IEC 61851 での通信規格により接続し、充電制御方式は Mode 3 である。RA システムと IoT-HUB の間は HTTPS 上で記述されたコマンドで TCP 接続である。

通信量の制約から、状態取得の場合には、充電器からメーカークラウドへの通信頻度は通常1分に1回程度に制限されており、非同期的な挙動となる。RA システムからの指令がクラウドドライバーを通じて、その時点までに充電

器からメーカークラウドに上げられていた最新値を取得する。モデル0ではそれを定間隔通信の記号によって表現している。他方、充電電流変更などの操作の場合には、クラウドドライバーからの指令がメーカークラウドから直ちに充電器に発出される。

6. 応答時間と応動時間の定量的把握

5.1 で扱った V2H 機の応答時間と応動時間の定量的な計測例が、文献^{7) 8)}に報告されている。ここでは文献⁷⁾の報告結果をモデル0により記述する。なお、文献^{7) 8)}では実験施設内にタイムサーバーを設置し、LAN で時刻同期して取得可能なタイムスタンプと電流計・電力計の読み値により、各区間の経過時間を計測している。

図8に充電開始時、図9に充電停止時の応答時間と応動時間の例をそれぞれ示す。通信関連の時間については、それぞれ、充電開始時は24回、充電停止時は23回の平均値、及び括弧内に最小値と最大値を示してある。全体として、充電開始時、充電停止時ともに通信部分での経過時間はほとんど変わらない一方、黄色で示された機器そのものの応動時間には、開始時と停止時で大きな違いがあることが見て取れる。

通信の遅延に着目すると、最も時間がかかっているのは RA システムブロックから IoT ルータブロックのドライバーモジュールに到達するまでの時間であり、1.8秒程度である。次いで、IoT ルータブロックからアダプタープロッ

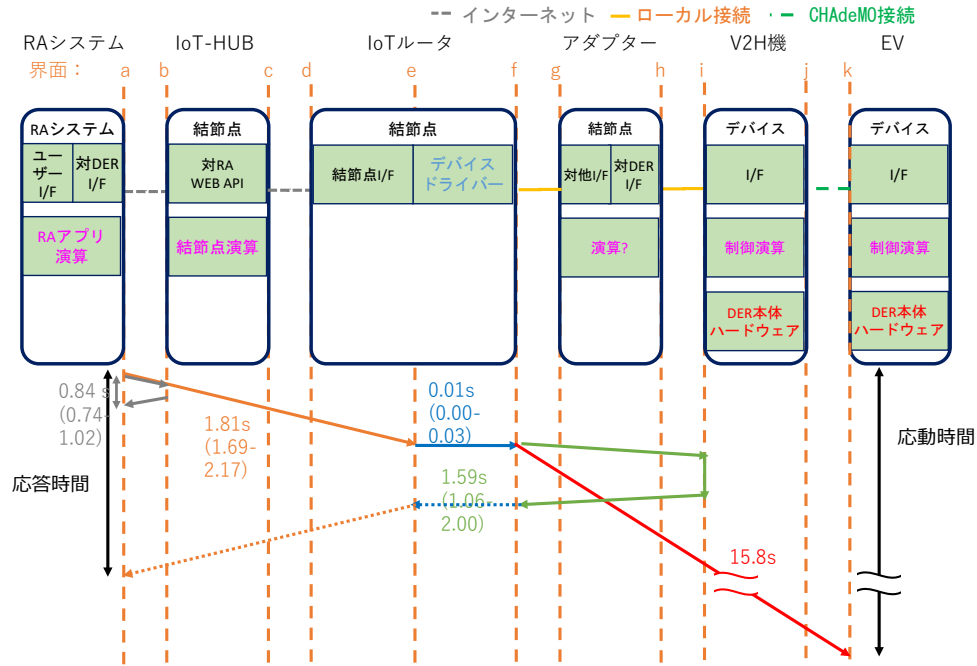


図 8 充電開始時の応答時間と応動時間の例

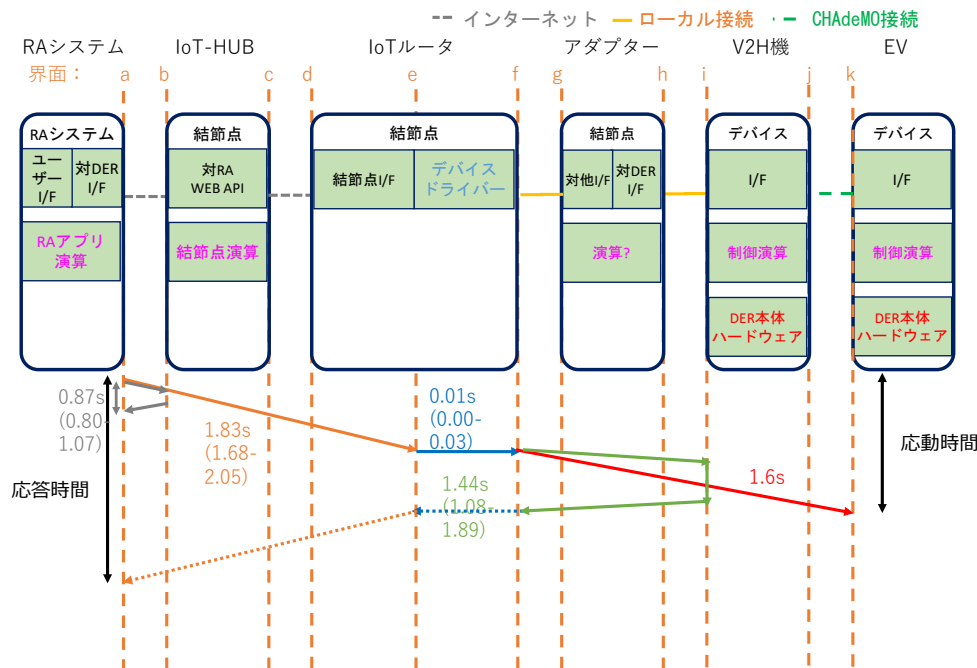


図 9 充電停止時の応答時間と応動時間の例

クに指令が出て、戻るまでの時間が充電開始時に 1.6 秒、充電停止時に 1.4 秒となっている。他方、機器そのものの応動時間は、起動時が 15.8 秒に対し停止時は 1.6 秒と 14.2 秒もの違いがある。結果として、応答時間が充電開始時に 5.2 秒、停止時に 5.1 秒と 0.1 秒しか差が無かったのに対し、応動時間は起動時に 17.6 秒、停止時に 3.4 秒と 14.2 秒の違いが生じた。

モデル 0 での記述をもとに考えると、例えば通信の遅延に関しては、RA システムと IoT-HUB、および IoT-HUB から IoT ルータの部分で HTTPS での接続のため、TCP の通信確立の上での HTTPS での暗号化された通信により、ある程度の時間がかかっている可能性が示唆される。また、起動時と停止時の応動時間の差については、主に DER 本体ハードウェアの動作時間の差異に起因すると考えられる。

なお、本計測例では応答特性・応動特性の精確な把握のためにタイムスタンプをローカルに同時計測する特殊な計測系が用いられている。しかし、実用上はそこまでの精度が要求されない多くのユースケースにおいては、例えばインターネット経由で秒単位の時刻同期をとりながら通信遅延・処理時間を取得し、別途取得された DER そのものの応動時間と合わせることで分析が可能と考えられる。

7. 考 察

通信システムとエネルギー機器の複合的挙動を理解する上では、通信全体の構造把握とデレイの把握という 2 つを整理することがポイントとなる。構造把握の点では、モデル 0 は 4 種類のブロックと 4 種類のモジュール、そしてアークを用いることで、RA システムと DER 間の様々な通信接続を共通の土台で話せる一形態を提供した。デレイに関しては、通信遅延と処理時間に区別した上で、通信遅延を生じさせるアークにはデレイに大きな影響を与える物理メディア・IoT に使用される通信プロトコル・アプリケーションのための通信プロトコルを記述することで、通信遅延時間の明示的な議論が可能になった。本稿で紹介した以外にも、RMWG ではモデル 0 によりいくつかのシステムを記述し、構造上の共通点・相違点や通信遅延・処理時間の議論を行っている。

なお、一般的に、クラウド上の Web システムは、Web サーバー、アプリケーションサーバー、データベースサーバーの 3 層構造をとるが、物理的に一台のサーバーで実装することもあれば、複数台の構成になることもある。最近では、サーバーレス (FaaS : Function as a Service) で実現することもあるため、モデル 0 はこうした実際の構築手段に依存しない表現にした。

他方、多数台の機器の接続を陽に記述する方法はモデル 0 には定義されていない。特に、1 つの RA システムから複数種類の DER が異なる接続方式を含んで接続する場合の構造把握やデレイの記述方法などは、今後の課題である。関連して、多数の DER が相互接続された場合、通信遅延や処理時間にはバラつきが大きく生じる部分とあまり生じない部分が生じると考えられる。それらを統計的に扱い、全体としてどのような応答特性・応動特性に見えるのかを記述することは、アグリゲータ視点で今後の重要な課題である。

8. お わ り に

本稿では、RA が DER をインターネット経由で制御する状況を想定し、通信システムとエネルギー機器の複合的な挙動を記述するための初歩的なモデルとして、モデル 0

を提案した。モデル 0 は、RA システムから DER に至るまでの相互接続の構造把握と、各要素における時間の経過を簡易的に整理することで、DER の応答時間・応動時間を分野の異なる人たちが共通のモデルで話し合える土台として構築した。

今後は本モデルを活用して DER の相互接続に関して様々な方とのディスカッションを積み重ねながら、DER の相互接続の普及により資するモデルにブラッシュアップしていきたい。

謝 辞

需要側電力システム研究会の皆様、特に Reference Model WG にて多大なるご尽力を賜っております IoT-EX (株)の松村淳様、(株)EX4Energy の伊藤剛様と岸川徳幸様、NTT アノードエナジー(株)の小山雅人様、(株)NTT データの永山誠様、東京電力ホールディングス(株)の天津孝之様、早稲田大学の光岡正隆先生、および同 WG オブザーバーである早稲田大学の石井英雄先生、東京大学の馬場旬平先生に心からの感謝を申し上げます。

(2023 年 8 月 30 日受理)

参 考 文 献

- 1) 第 4 回需給調整市場検討小委員会(2018.5.23)資料 2
http://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2018/2018_jukyuchousei_04_haifu.html
- 2) 馬場博幸・野城智也, 相互接続基盤としての IoT-HUB の活用方策, 生産研究, 74-2, pp.175-179 (2022)
- 3) 今中政輝・佐々本英紀・島田夏樹・馬場旬平ほか 3 名, 可変送水ポンプの消費電力制御による変動性再生可能エネルギー出力変動補償に向けた基礎検討, 電気学会 D 部門誌, 138, 6, pp.672-679 (2016)
- 4) 奥谷和也・馬場旬平・太田豊, 家庭用ヒートポンプ給湯機の可制御負荷利用時における需要側・系統側影響の検討, 電気学会 B 部門誌, 136, 1, pp.72-78 (2016)
- 5) 蜷川忠三・安積英駿・高浜盛雄, ビルマルチ空調設備群 FastADR 閉ループ制御のための非対称定率増減伝達関数モデル, 電気学会 B 部門誌, 137, 8, pp.566-572 (2017)
- 6) モバイルコンピューティング推進コンソーシアム監修: 「IoT の通信トラフィックの特性」, 『IoT 技術テキスト第 3 版—MCPC IoT システム技術検定中級対応—』, リックテレコム, 4-4 (2021)
- 7) 今中政輝・馬場博幸・荻本和彦, コネクティッド化された電気自動車充電器の応答・応動時間の計測, 日本環境学会第 49 回研究発表会, A-3, 浜松 (2023)
- 8) M. Imanaka, H. Baba and K. Ogimoto: "Measurement of ICT Latency and Full Activation Time for Fast Demand Response of Electric Vehicle Charging", 7th E-Mobility Power System Integration Symposium, EMOB23-93, Copenhagen, Denmark (2023)