

修 士 論 文

Late bindingを用いた分散型電力割当て プラットフォームの設計と実装

The Design and Implementation of a Distributed
Power Assignment Platform Using Late Binding
Mechanism

指導教員 森川 博之 教授



東京大学大学院工学系研究科
電気系工学専攻

氏 名 37-106475 中嶋 毅彰

提 出 日 2012年2月8日

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	2
1.2	本論文の構成	3
第 2 章	サービスシナリオと機能要件	4
2.1	はじめに	5
2.2	サービスシナリオ	5
2.3	サービスリスト通知機能	5
2.4	サービス提供機器探索機能	7
2.5	サービス需給制御機能	7
2.6	おわりに	7
第 3 章	電力割当てプラットフォームの設計	9
3.1	はじめに	10
3.2	サービス実現の全体像	10
3.3	サービスレジストリ	12
3.4	サービス要求解決機構	13
3.4.1	サービス広告の伝播	16
3.4.2	サービス要求のルーティング	19
3.4.3	サービス需給制御	22
3.5	おわりに	23
第 4 章	サービス要求解決機構の実装	24
4.1	はじめに	25
4.2	実装の全体像	25
4.3	SPFC の動作	28

4.3.1	SPFC	28
4.3.2	T-SPFC	30
4.4	おわりに	31
第 5 章	関連研究	32
5.1	はじめに	33
5.2	サービス発見・名前解決	33
5.3	電力割当て	34
5.4	電力網の管理・運用・制御アーキテクチャ	34
5.5	おわりに	35
第 6 章	結論	36
6.1	本研究の主たる成果	37
6.2	今後の課題	38
謝辞		39
参考文献		41
発表文献		44

目次

1.1	本研究の対象領域	2
2.1	サービスシナリオ例	6
2.2	わが国の典型的な配電網	8
3.1	サービス実現の全体像	10
3.2	ショッピングモールにおける電気自動車への無料充電サービスの情報 . .	12
3.3	メーカーによる電気自動車への充電サービスの情報	13
3.4	サービス要求解決機構の全体像	14
3.5	サービス要求の開始から終了までのシーケンス	16
3.6	一般的な電力供給のサービス提供情報	17
3.7	ショッピングモールにおける電気自動車への充電サービス提供情報 . . .	17
3.8	サービス提供情報の集約	18
3.9	ショッピングモールの充電サービス要求情報	19
3.10	発電方法と価格のみを指定したサービス要求情報	19
3.11	広告情報の集約によりサービス要求のルーティングが失敗する例	21
4.1	実装したシステムの全体像	25
4.2	MPPT 回路のスキーマ	26
4.3	MPPT 回路の基板配線図	26
4.4	T-SPFC が表示する割当て結果	28
4.5	サービスプロパティテーブルの構造	29
4.6	SPFC ルーティングテーブルの構造	29
4.7	発電機情報テーブルの構造	30
4.8	消費機器情報テーブルの構造	30

■ 表目次

4.1	システムに登場するサービス	27
4.2	各機器の要求 / 提供するサービス	27

第 1 章

序論

1.1 研究の背景と目的

地球環境問題への意識の高まりから，再生可能エネルギー電源の代表である太陽光発電システムの導入が進められている．また，東日本大震災による電力網への不安の広がりから，商業施設，オフィスビル，工場などへの独立電源の導入も進められている．需要地の付近に分散型電源として導入されたこれらの発電システムは，周波数調整力の不足や配電電圧逸脱といった電力系統を不安定にする問題を引き起こす．

これらの問題に対し，従来の電力網に積極的に情報通信技術を適用することでより安定度の高い電力網を構築するための研究が盛んに行われている．このような電力網はスマートグリッドと呼ばれ，たとえば，分散型電源サイドによる無効電力制御 [1, 2] や，電気自動車のもつ蓄電池の系統周波数調整への利用 [3] およびその際の通信遅延の影響 [4]，需要家の利便性や公平性を考慮しつつ電力需要を削減するためのデマンドレスポンス [5, 6, 7] などの研究が行われている．

スマートグリッドが実現され，電力網に多数の分散型電源や電気自動車が遍在する環境においては，それらを用いて個人や事業者が多様な電力サービスを自由に提供することが望まれると筆者は考えている．図 1.1 に示すように，本研究は将来の電力網における多様なサービス実現を目指している．実現すべきサービスとしては以下のようなものを想定している．

- 特定のオフィスソフト起動時に，ソフトウェアベンダによりパソコンへグリーン電力が供給されるサービス
- 適切な設定温度で運転中の冷暖房に安価に電力が供給されるサービス
- 研究室のメンバ同士での電力融通サービス

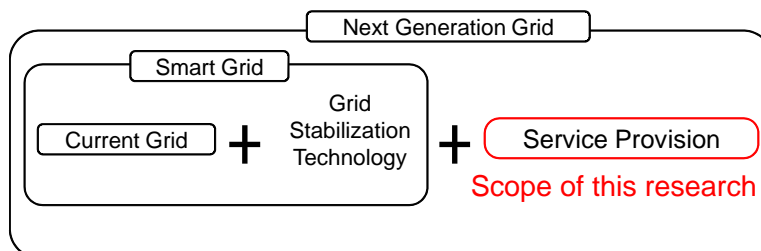


図 1.1 本研究の対象領域

これらのサービスを実現するためには、電力網の中では物理的に区別することのできない電力を、特定の機器間で送受電しているとする電力割当てを行う必要がある。電力割当てを行う機構は、サービスごとに構築することも可能だが、多様なサービス実現を促進するために必要な基本機能はプラットフォームとして提供されることが望ましい。

このような観点から、本研究では電力割当てプラットフォームの構築を進めている。本論文では、サービス実現に必要となる機能の抽出及びその機能を提供する機構の設計と実装を示す。

1.2 本論文の構成

本論文では、分散型電源を用いた多様なサービス実現に資する分散型電力割当てプラットフォームについて、以下の構成で述べる。

まず、第 2 章では想定環境における典型的なサービスシナリオについて説明を行い、そのようなサービスを実現するのに必要となる機能を抽出する。これを受け、第 3 章では各機能を実現する分散型電力割当てプラットフォームの設計について述べる。第 4 章では、コンセプトを例証する目的で実装したシステムについて述べる。さらに、第 5 章で本研究と関連する研究や制度について述べ、最後に第 6 章で本研究の貢献と今後の課題についてまとめる。

■ 第 2 章

サービスシナリオと機能 要件

2.1 はじめに

本章では，典型的なサービスシナリオから電力割当てプラットフォームが提供すべき機能の抽出を行う．まず，2.2 においてサービスシナリオの説明を行う．このシナリオから抽出されるサービスリスト通知機能，サービス提供機器探索機能，サービス需給制御機能についてそれぞれ 2.3，2.4，2.5 において述べる．

2.2 サービスシナリオ

大量に導入された分散型電源や電気自動車を用いた典型的なサービスシナリオとして，図 2.1 に示すものを考える．

A さんは休日に電気自動車でショッピングモールにやってきた．このショッピングモールでは，屋根に設置された太陽光発電システムによって買い物客の電気自動車が買い物中に無料で充電されるサービスを提供している（図 2.1 中 (a)）．

このサービスでは，一時的な曇天や電気自動車の増加で太陽光発電システムの供給が不足した場合も，系列店舗の太陽光発電システムの供給に余裕があれば，そちらからの供給に途切れなく切り替わる（図 2.1 中 (b)）．

A さんが買い物を終えて帰宅すると，電気自動車は A さんの友人に安価に電力を提供するサービス提供電源となる（図 2.1 中 (c)）．

A さんの友人は視聴していたテレビにこの電力供給を受けていたが，チャンネルを切り替えると番組のスポンサーがテレビの電力を供給するサービスを提供していたため，A さんからの電力受給を終了し，このサービスの電力受給を開始した（図 2.1 中 (d)）．

2.3 サービスリスト通知機能

2.2 で述べたサービスシナリオを現実のものとするためにはまず，機器が自身の要求可能なサービスの情報を取得するためのサービスリスト通知機能が必要となる．サービスの情報としては，価格，提供される電力の発電方法，サービスの提供者などのサービス提供情報と，ショッピングモールに駐車中の電気自動車が受給可能であるなどのサービス受給条件がある．

ショッピングモールは充電サービスによって買い物客の増加を期待していると考えられるため、このようなサービス情報は現在来店中の買い物客だけでなく、全ての電気自動車取得可能であるべきである。即ち、各サービス要求機器は現在条件を満足しているサービスだけでなく、条件を満足しうる全てのサービスに関する情報を取得可能であるべきである。

本機構が扱うこれらの情報は価格のような一部のサービス提供情報を除いて静的なものである。

サービスシナリオで述べたサービスを実現するためには、各機器がサービスの条件を満たしているかを判断する必要がある。しかし、この判断の方法はサービスと機器に大きく依存するのでプラットフォームでは提供しない。

サービス提供機器側もサービス要求機器に対して「ショッピングモールの駐車場に駐車中の電気自動車」などの条件を指定する。これについては、機器が常にサービス要求のルールを守るという仮定の下、「ある条件を満たしている時しかプラットフォームに送信してはならないサービス要求」を定めることで条件指定が可能である。

本研究ではサービスシナリオで示したサービスの実現に向け、その基本的な必要機能を明らかにすることが目的であるため、機器は常にサービス要求のルールを守るとを仮定し、特定のサービス要求を行っていることを持ってその条件を満たしていることの確認とすることにする。このようなサービス要求は名前管理機構によって一意性の保証された単

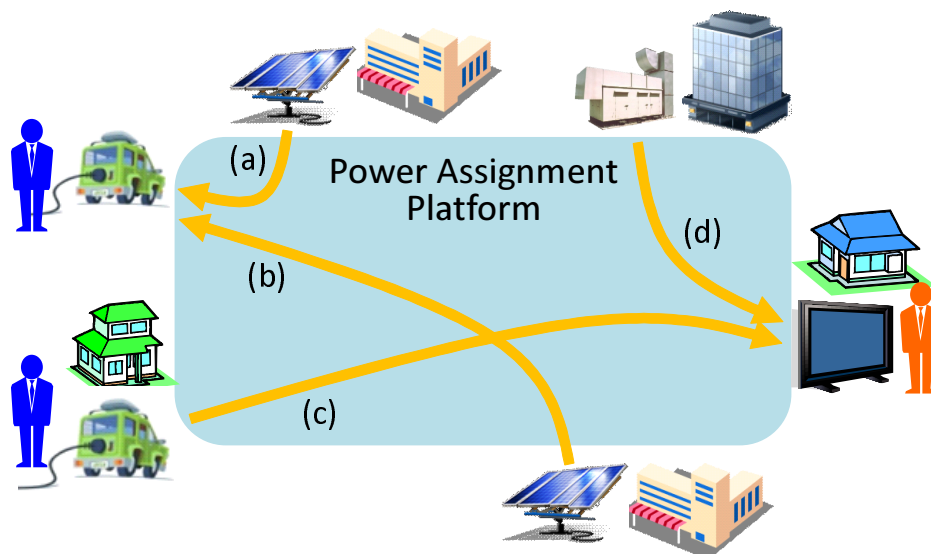


図 2.1 サービスシナリオ例

純なサービス ID で可能である。

2.4 サービス提供機器探索機能

サービス要求機器の要求するサービスを現在提供可能なサービス提供機器を探索する機能が必要である。

サービス提供機器探索機能に求められる 1 つ目の要件として、応答性がある。サービスシナリオでは、EV などの機器の移動、視聴番組などの機器状態の変化、消費 / 発電量の変動により、機器の要求するサービス内容とその電力量、実際にサービスを受給可能な電力は常に変化する。このように動的な環境である電力網上において、サービス要求 / 提供機器に意識させることなくサービスを継続する必要がある。

2 つ目の要件は柔軟なサービス記述である。上記の電力サービスは、消費 / 発電機器において送電元 / 電力供給先に対する条件を指定するものであると言える。送電元 / 電力供給先に対する条件指定としては、消費機器がサービスに更に条件を加えたり、発電機がサービス要求機器の満たす条件ごとに価格を変えろといったことがありうる。このため、サービスを表すためには様々な条件を表現可能な記述が必要となる。

3 つ目は、電力の地産地消の促進である。わが国の典型的な配電網の様子を図 2.2 に示す。分散型電源が大量に導入されると、配電電圧維持、配電損失低減の観点から逆潮流を抑制するために電力の地産地消が求められる。この要求に応じ、サービス需給改善のために制御を行う際は各機器の位置するエリアの電力需給状況を考慮する必要がある。

2.5 サービス需給制御機能

シナリオ中の電力サービスは、電力割当てに応じてサービス提供機器が実際に電力を電力網に供給することで初めて実現される。そのため、各サービス提供機器に現在そのサービスを要求している電力がどれだけあるのかを通知する機能が必要となる。電力網における電力の需給一致を考慮すると、発電機はこの量と過不足なく発電を行わなくてはならない。

2.6 おわりに

本章では、本研究の想定する多様なサービスの実現した世界におけるサービスシナリオを提示し、その実現に必要な機能を電力網の特性も考慮して抽出した。次章では、この機

能を実現するプラットフォームの設計について述べる。

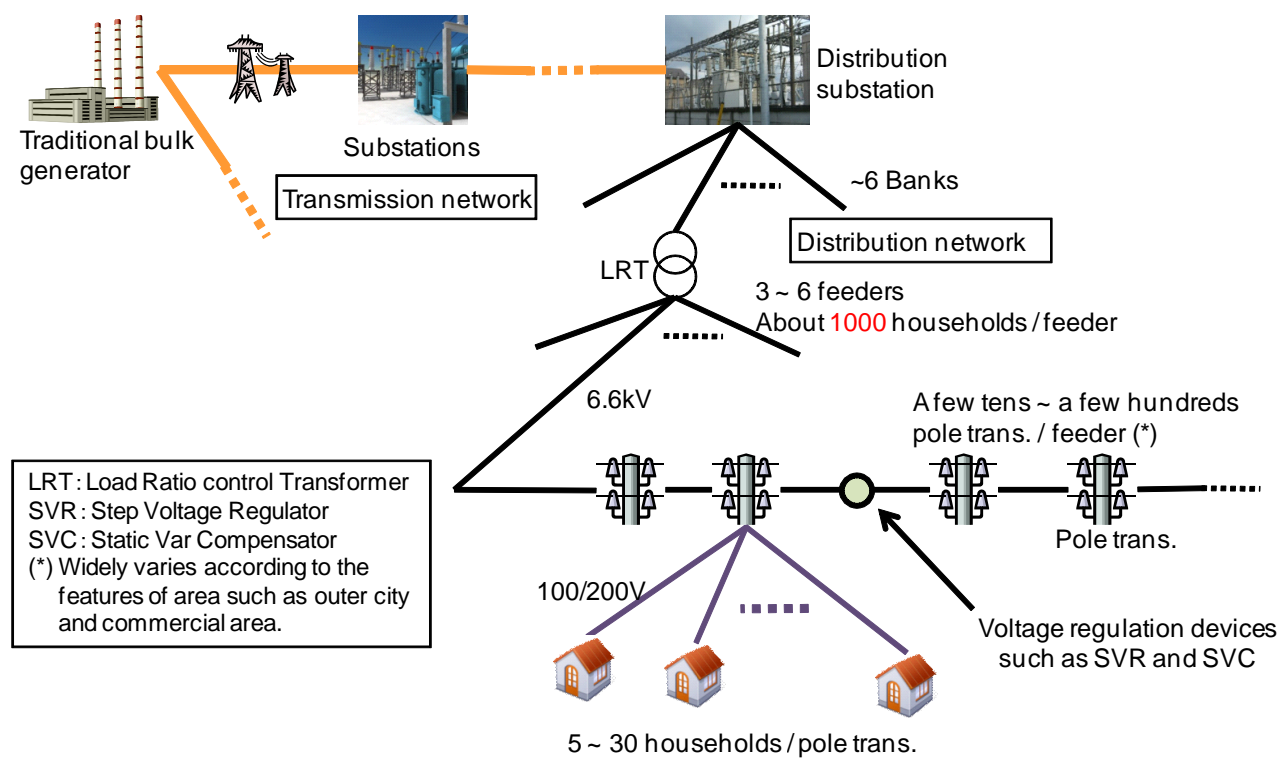


図 2.2 わが国の典型的な配電網

第 3 章

電力割当てプラットフォーム の設計

3.1 はじめに

本章では，第2章で抽出した機能要件を元に分散型電力割当てプラットフォームの設計を行う．まず3.2で電力割当てプラットフォームを用いたサービス実現の全体像を概観する．その後，プラットフォームを構成するサービスレジストリ及びサービス要求解決機構がどのようにして第2章で述べた機能要件を実現するかをそれぞれ3.3，3.4で述べる．

3.2 サービス実現の全体像

図3.1に電力割当てプラットフォームを用いたサービス実現の全体像を示す．電力割当てプラットフォームは，サービスリスト通知機能を提供するサービスレジストリと，サービス提供機器探索機能とサービス需給制御機能を提供するサービス要求解決機構によって構成される．

サービス提供者は，サービスの受給条件や価格などのサービス情報を決定する．サービス内容を多くの機器に公開する場合は，このサービス情報をサービスレジストリに登録する．そして，発電機に対してそのサービスを提供するようサービス提供設定を行う．たと

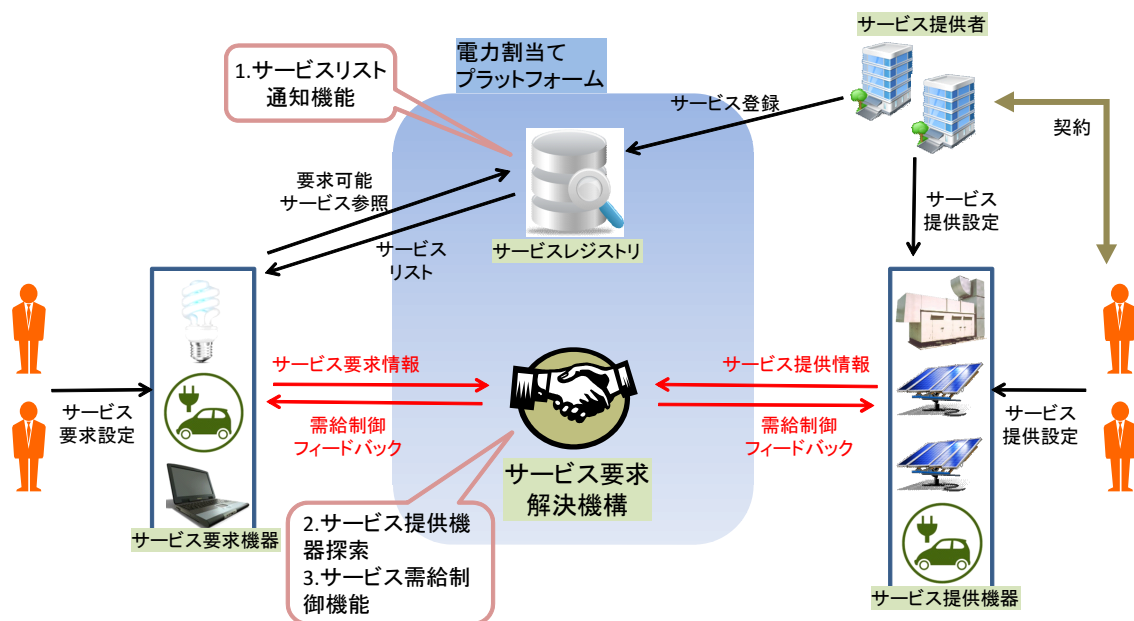


図 3.1 サービス実現の全体像

例えば2.2で示したサービスのうち、ショッピングモールの提供する充電サービスはサービスレジストリへの登録を行うべきである。逆に、Aさんから友人への電力供給サービスは登録の必要はない。

サービス提供者は必ずしも自身の所有する発電機を用いてサービス提供を行う必要はない。たとえば、ある企業がサービスを開始するに当たり、提携企業や一般家庭と売電契約のようなものを結び、その発電機にサービス提供設定を行うことで初期投資を抑制するといったことは可能である。

サービスレジストリは、サービス提供者から登録された公開サービス情報のデータベースであり、2.3で述べたサービスリスト通知機能を提供する。サービスレジストリはサービス要求機器のサービス参照に対して、その機器が要求可能となりうるサービスの情報を通知する。

サービス提供機器は、サービス提供者の設定に従ってサービス要求解決機構に自身のサービス提供情報を定期的に広告し、サービス要求解決機構の需給制御フィードバックに従って自身の発電量を制御する機能を持つ。この機能はプラットフォームを利用するために機器に必要となるものである。このような機能の実現例として、サービス提供者が各機器内の簡易 Web サーバにアクセスして内部の変数を書き換え、それに従って機器がサービス提供情報を送信するという方法が考えられる。

サービス提供情報には、提供するサービスの名前や価格、発電方法、現在の割当て余力が含まれている。これに関しては3.4.1にて詳述する。

サービス要求機器は、公開されているサービスの受給を要求する場合には必要な情報を予めサービスレジストリから取得しておく。公開されていないサービスの場合は、予めサービス利用者（機器の所有者を想定している）が要求に必要な情報を直接機器に設定しておく。この設定には、サービスを提供機器を更に細かく指定するものや、サービスを受給できなかった場合の処理などが含まれる。具体的には、「友人との電力融通サービスのうち、グリーン電力だけを受給したい」「価格が¥20/kWh以下の時のみこのサービスを受給したい」「番組のスポンサーの電力供給サービスを受給できない場合にはテレビの輝度を落とす」等があり得る。サービス要求機器はこの設定に従ってサービス要求情報をサービス要求解決機構に送信する。

サービス要求解決機構はサービス提供情報とサービス要求情報の間でマッチングを行い、サービス要求に合致するサービスを提供している機器を探索する。探索の結果サービス提供機器が見つかった場合には、電力の割当てを最終的に実行し、サービスを実現する。その後はサービスの需給を一致させるようにサービス提供機器に制御を行う。

以下では、プラットフォームを構成するサービスレジストリ及びサービス要求解決機構

の動作について詳細に述べる。

3.3 サービスレジストリ

サービスレジストリは、割当てに必要な情報のうち変更の頻度が数日以上程度の比較的静的な情報を扱う。サービスレジストリが提供すべき機能は既存技術で実現可能である。

サービスレジストリがサービス要求機器に通知するサービス情報の例として、ショッピングモールにおける無料充電サービスと電気自動車のメーカーが提供する充電サービスを図 3.2 及び図 3.3 に示す。このように、サービスの情報は属性と値を組み合わせたサービスプロパティを複数並べて記述する。このような形で表現される名前（本研究では電力サービスの提供機器）は、「記述的（descriptive）[8]」な名前であるという。

ID は、サービス条件とサービスの要求を組にしたものごとにサービス名管理機構から与えられる。サービス要求機器は、第 2 章で述べたとおり、サービス要求情報にこの ID を含めることで自身がサービス条件を満たしており該当するサービスを要求していることを表明する。逆に、サービス条件を満たしていない場合はこの ID を用いてサービス要求を行ってはいけない。ID を含むサービス名の記述は、DNS における IANA のような名前管理機構によって一意性が保障されるものとする。

Name と Description に記述される情報は、電力割当てに直接影響するわけではないが、サービス要求設定をサービス利用者が行う際に、サービスを区別したりするのに用い

```
[ServiceInfo. =  
  [ID = 89610]  
  [Name = ショッピングモールナカジマ無料EV充電サービス]  
  [Description =  
    ショッピングモールナカジマで1500円以上お買い上げのお客様に、本店舗  
    及び系列店舗の発電システムから無料でEVを充電します。  
  ]  
  [ProvisionInfo. =  
    [Price = ¥0/kWh]  
    [Provider = Shopping Mall Nakajima]  
  ]  
  [Condition =  
    [DeviceType = ElectricVehicle]  
    [ParkingPlace = ショッピングモールナカジマ]  
  ]  
]
```

図 3.2 ショッピングモールにおける電気自動車への無料充電サービスの情報

られる。

ProvisionInfo. には、ID の表す情報のうちサービス提供機器に関する情報が記述される。ここでは、このサービスは無料でショッピングモールの電源から供給されることが記述されている。

Condition には、ID の表す情報のうちこのサービスの受給に必要な条件が記されている。この例では、ショッピングモールに駐車中の電気自動車であることがサービス受給の条件であることが記述されている。サービス要求機器は、ここに記される条件を満たした場合にのみ ID を用いてサービス要求を行う。

なお、2.3 で述べたように、サービスリスト通知機能は単にサービスの条件を通知するのみであり、実際に各機器がその条件を満たすかどうかの判断は別の機構によって実現される。この例では、サービス要求機器は「自身が電気自動車である」とことと「現在ショッピングモールナカジマに駐車中である」ということを判断する必要があるが、それは予めメーカーによって設定されていたり、ショッピングモール駐車場でビーコンを受け取るなどの方法で判断するものとする。

3.4 サービス要求解決機構

サービス要求解決機構は、発電 / 消費量など動的な情報を扱い、リアルタイムな電力割当てを行う。図 3.4 にサービス要求解決機構の全体像を示す。本機構は、電力網の構造に即して階層的に配置された Smart Power Flow Controller (SPFC) として構築され

```
[ServiceInfo. =
  [ID = 10399]
  [Name = ヨネカワ社電気自動車低額充電サービス]
  [Description =
    ヨネカワ社の電気自動車を充電中の皆様には、ヨネカワ社から安
    価に電力を供給いたします。価格は変動します。
  ]
  [ProvisionInfo. =
    [Provider = Yonekawa Inc.]
  ]
  [Condition =
    [DeviceType = ElectricVehicle ]
    [Vender = Yonekawa Inc.]
  ]
]
```

図 3.3 メーカーによる電気自動車への充電サービスの情報

る．SPFC は静的なものであり，各 SPFC は自身の直上及び直下の SPFC のアドレスを把握している．このような SPFC 配置の理由は，既設の電気事業者の制御用回線の利用と，ローカル優先のサービス提供機器探索がある．

本機構は第2章で抽出した3つの機能のうち，サービス提供機器探索機能とサービス需給制御機能を提供する．これらの機能が満たすべき要件は本機構において以下のようにして満足される．

本機構では，電力網上に配置された Smart Power Flow Controller (SPFC) がサービス提供機器から定期的に広告されるサービス提供情報に従ってサービス要求情報を動的にルーティングすることでサービス需給状況の変化に透過的な電力サービスが実現される．

また，サービス提供機器の広告やサービス要求に含まれるサービス名は，サービス提供者やサービス利用者が名前管理機構の設定したルールに反しない範囲で自由に記述可能である．これにより複数のサービスを広告／要求したり，サービスレジストリから得られる情報に更に発電方法や価格の条件を加えたりといったことがサービス提供者／利用者の意思で容易に実現可能である．

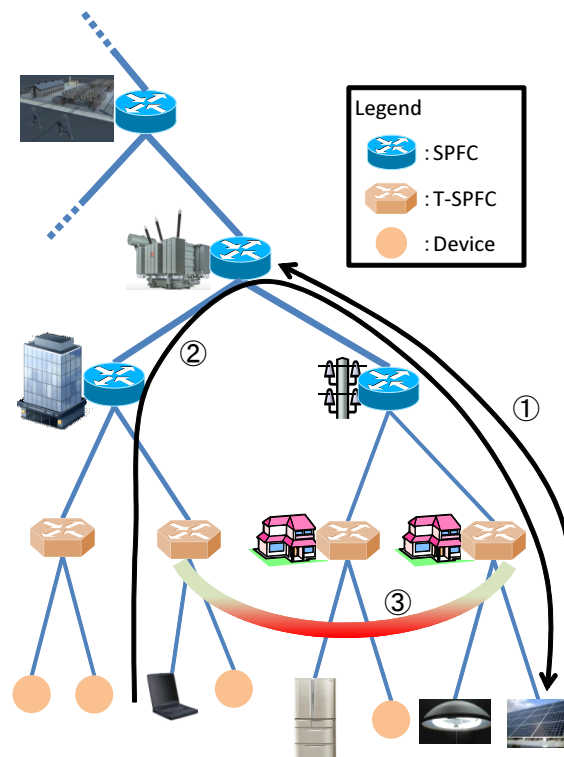


図 3.4 サービス要求解決機構の全体像

このとき、電力網の階層的なトポロジに従ってされた SPFC を用いて電力網内で可能な限り近い機器間で需給一致制御を行うことで地産地消指向の電力制御を行う。地産地消の要件から、1つの階層構造は現在の電力会社単位程度を想定しているが、通信量、計算量の観点からはシステムとしてはその規模は問わない。また、将来の電気事業のあり方によってもどのような単位でこの管理機構を持つかは変化するため、その点については本研究ではこれ以上言及しないものとする。

サービス提供機器は末端の SPFC (Terminatory SPFC: T-SPFC) を通じ、サービス提供情報を本機構に対して広告する。サービス要求機器は T-SPFC を通じ、サービス要求を本機構に送信する。これら提供情報 / 要求情報に含まれる詳細な情報はそれぞれ 3.4.1 及び 3.4.2 の各小節にて述べる。

SPFC はインターネットにおける IP ルータのような役割を果たす。発電機のサービス広告を上方の SPFC に伝播 (図 3.4 ①) させると共に、広告されたサービス提供情報に基づき、サービス要求情報をルーティング (図 3.4 ②) し、サービス提供機器直上の T-SPFC まで転送する。

T-SPFC は SPFC 同様のサービス広告に加え、転送されてきたサービス要求に対して最終的な割当て処理を実行し、T-SPFC 間でセッションを確立する。セッション確立後は、T-SPFC 間で直接電力割当てと需給制御を実行する (図 3.4③)。

図 3.6 に、あるサービス要求機器に注目した時の基本的なシーケンスを示す。

サービス要求解決機構の動作は、サービス広告の伝播、サービス要求のルーティング、サービス需給制御という3つのステップに分けることが出来る。以下では、3.4.1 でサービス広告の伝播、3.4.2 でサービス要求のルーティング、3.4.3 でサービス需給制御について述べる。

なお、本設計では、まずは電力割当てという最も重要な機能をいかに提供するかを示すことを目的とするため、以下の前提をおいている。

- 全ての SPFC、サービス要求 / 提供機器は一意的な ID を持つ。
- 各機器の送信する情報は何らかの認証機構を経由しており、信頼のできるものである。即ち、各機器の消費電力や発電電力は実際に消費 / 発電されたものである。また、サービス受給に際して条件の設定されているものについては条件を満たした時のみサービスレジストリから取得した ID によってサービスの要求を行う。
- 全てのサービス提供機器は、自身の発電量を [0 ~ 現在の発電量 + 割当て余力 (SLACK)] の範囲で即座に調整可能である。
- 全てのサービス提供機器は、定格以下の任意の出力で運転が可能である。

3.4.1 サービス広告の伝播

図 3.6 及び図 3.7 にサービス提供機器が本機構に送信すべきサービス提供情報の一例を示す．これらはそれぞれ，一般的な電力供給サービスとショッピングモールにおける電気自動車への充電サービスの提供情報を表している．

DeviceID は，サービス提供機器の持つ一意なアドレスであり，現在のインターネットにおける MAC アドレスに相当し，T-SPFC が自身に各機器サービス提供情報を送信してくる各機器を識別するのに利用される．

Slack はこのサービス提供機器の割当て余力を示す．もともと Slack は他研究で電力の需給制御を行うために電力の消費機器に対して定義された値であり [9]，その機器が現在調整可能な電力を表す．本研究ではこの値をサービス提供機器，即ち電源側にも適用して用いる．

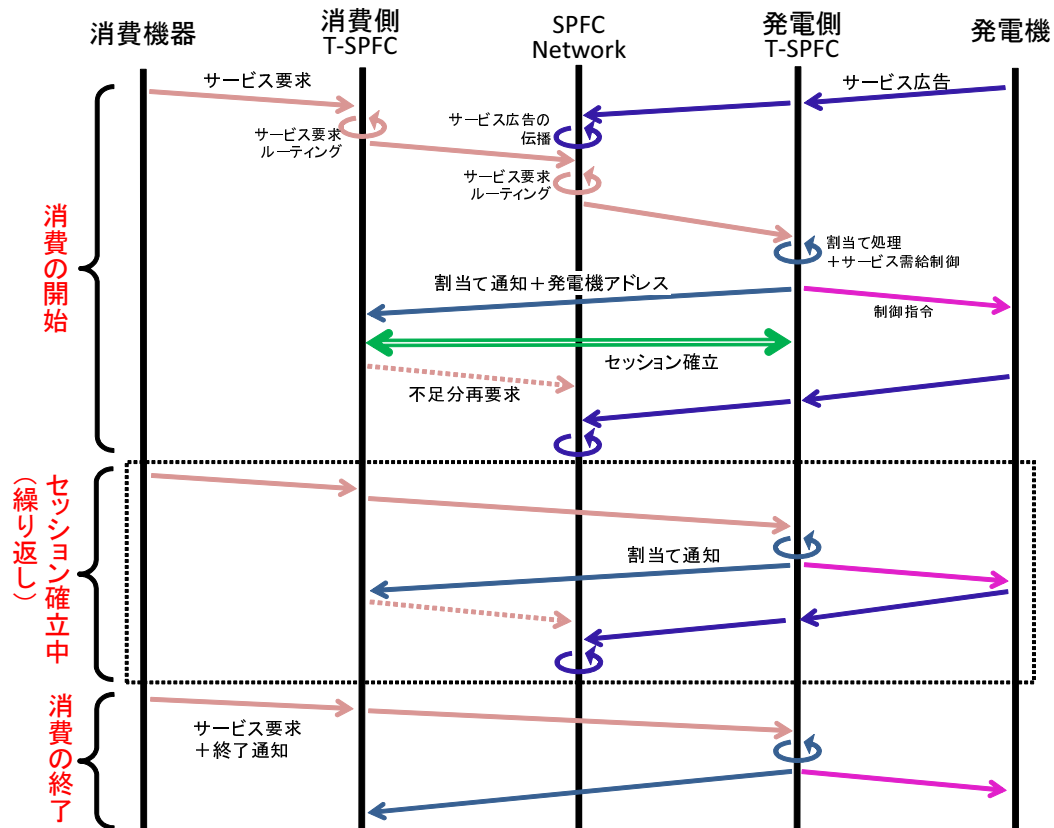


図 3.5 サービス要求の開始から終了までのシーケンス

本研究における Slack は、蓄電池などを併用して十分短い間に变化させられる消費 / 発電量と定義する。この値は消費側 / 発電側共通して電力網から電力を取りだす方をマイナス、流入させるする方をプラスとする。

以上の 2 要素は必須要素であり、サービス提供情報に必ず含まれる。この機器が提供されるサービスは、主にこの下の部分で記述される。一般的な電力供給サービスの例では、まず Price タグでサービスの価格を指定している。次いで、GenType タグでこの機器の発電方法を明示している。これにより、太陽光発電のグリーンな電力を所望する機器に対して提示した価格で電力供給を行う。

一方、ショッピングモールの充電サービスの方では、REQ.ServiceID 要素で機器の条件を指定している。これにより、サービスレジストリからこのサービスの情報を入手したサービス要求機器の送信するサービス要求情報はこのサービス提供機器の直上の T-SPFC に到達可能であるようにする。先頭に付けられている REQ. は、「この要素を要求情報に含めている機器のみにサービス供給を行う」ことを示している。これにより、たとえば単に「¥25/kWh 以下の PV」を要求している機器にこの電力サービスが供給されないよう

```
[ServiceProvision =  
  [DeviceID = 67890]  
  [Slack = +1367.9W]  
  
  [Price = ¥25.4/kWh]  
  [Gen.Type = PV]  
  [Provider = Shopping Mall Nakajima]  
]
```

図 3.6 一般的な電力供給のサービス提供情報

```
[ServiceProvision =  
  [DeviceID = 67890]  
  [Slack = +1367.9 W]  
  
  [REQ.ServiceID = 89610]  
  [Gen.Type = PV]  
  [Provider = Shopping Mall Nakajima]  
  [Price = ¥0/kWh]  
]
```

図 3.7 ショッピングモールにおける電気自動車への充電サービス提供情報

に指定する．

SPFC でのサービス提供情報は，属性と値を組み合わせたサービスプロパティごとに集約されながら上方に広告されていく．この様子を図 3.8 に示す．具体的には，サービス提供情報を各機器から受け取った T-SPFC は，サービス提供情報内のサービスプロパティごとにそのプロパティを送ってきた機器のデバイス ID とその割当て余力を保持する．そして，自身の ID と共に直上の SPFC へサービスプロパティごとの割当て余力の総和を送信する．図中では，赤字で記述された発電方法に関するプロパティが集約されながら階層上方の SPFC へと広告されている．この集約の長所・短所については 3.4.2 で述べる．

DeviceID が共通であることから，図 3.6 と図 3.7 の 2 つのサービス提供情報は同じ機器から送信されたものであると分かる．これは，この機器が複数のサービスを提供しているということに他ならない．この場合，双方に同じ Slack を記述する．これは Slack を事実より多く広告していることになるが，SPFC のサービス要求ルーティングは最短経路でのルーティングを保証しないため，電力割当ての可能性を広げるようにこのような広告を行う．

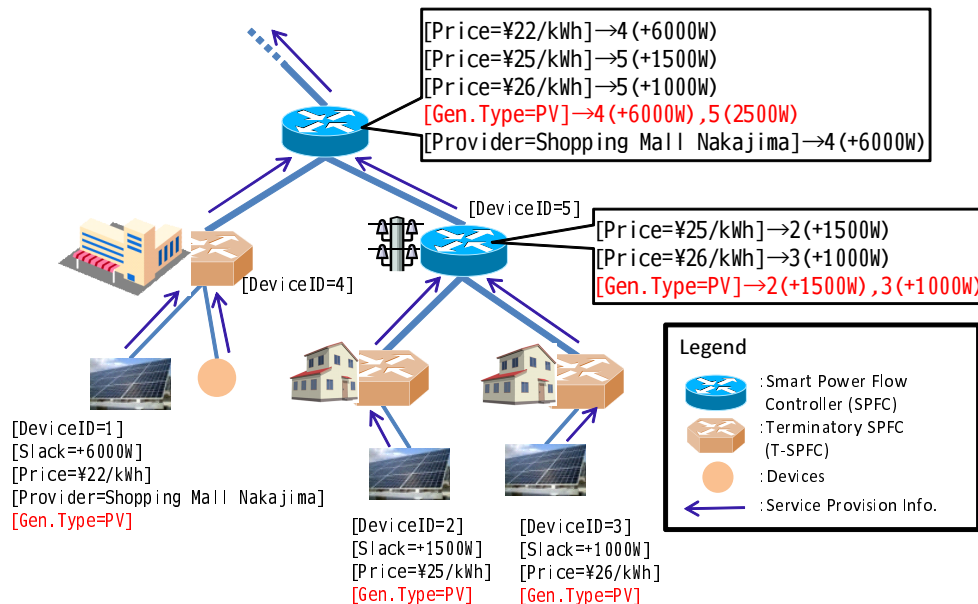


図 3.8 サービス提供情報の集約

3.4.2 サービス要求のルーティング

サービス要求のルーティングでは、消費機器の送信したサービス要求を、そのサービスを提供するサービス提供機器の直上の T-SPFC に転送する。

図 3.9 及び図 3.10 にサービス要求機器が本機構に送信すべきサービス要求情報の一例を示す。これらはそれぞれ、ショッピングモールにおいて充電サービスを要求する際と一般的に価格のみを指定して電力を受給する際のサービスの要求情報を表している。

各消費機器は、使用開始時に消費電力と要求サービスを直上の T-SPFC に送信する。サービス要求もサービス提供と同様にサービスプロパティの列として記述する。ただし、[Price ¥27/kWh] 等の範囲指定を SPFC がサポートする。

各 SPFC は、受信した要求サービスのプロパティを下方から広告されたプロパティと参照し、結果に従って要求を動的にルーティングする。具体的には、要求サービスに含まれるプロパティを全て含む広告を行っている SPFC が直下の SPFC の中に存在すれば、その SPFC へ要求を転送する。その際、サービス広告内の REQ. についてはチェックする。存在しなければ、サービス要求を直上の SPFC へ転送する。このように、下方からの

```
[ServiceRequest =  
  [DeviceID = 12345]  
  [PowerCons. = -2000W]  
  [Slack = +1000W]  
  
  [ServiceID = 89610]  
]
```

図 3.9 ショッピングモールの充電サービス要求情報

```
[ServiceRequest =  
  [DeviceID = 12345]  
  [PowerCons. = -507.8W]  
  [Slack = +60.0W]  
  
  [Price < ¥26.0/kWh]  
  [Gen.Type = PV]  
]
```

図 3.10 発電方法と価格のみを指定したサービス要求情報

広告情報との照合を先に行うことで、ローカル優先のサービス要求機器探索を実現する。

このように、サービス提供機器の位置解決と、割当てに必要な消費量のルーティングを同時に行う Late binding 型の機構 [10] とすることで、サービス提供機器の変化に透過的なサービス要求を実行可能である。即ち、サービス要求機器は最初にサービス要求を送信する際は要求サービスのみを指定し、その提供機器のネットワーク上での位置などを考慮する必要がない。

SPFC は単にサービスプロパティの照合を行うだけであり、サービス要求機器は、サービスレジストリから得た情報に限らず、名前管理機構の定めたルールの範囲内でサービスプロパティを自由に組み合わせてサービスを要求することが可能である。もしもそのサービス要求に合致する広告を行っているサービス提供機器があれば、その機器にサービス要求はルーティングされる。たとえば、必ずしもグリーンな電力を提供しているわけではないサービスに対し、サービス要求側でグリーンな電力のみを指定したり、¥25/kWh 以下で価格の変動するサービスに対し ¥22/kWh 以下の時のみ要求を出したりすることが可能である。これによりサービス要求者の多様な要望に応えられるようになっている。

図 3.9 に示すように、サービス広告は集約により情報が失われているため、サービス要求は必ずしも最短経路で適切な T-SPFC にはたどり着かない。図 3.9 において、[Price ¥27/kWh] [Gen.Type=PV] の要求は④の T-SPFC までルーティングされるが、該当機器がないためこの T-SPFC は割当てを行わずにサービス要求を返送する。

サービスプロパティの集約にはこのような短所もあるものの、集約を行わない場合は階層の上方の SPFC が管理下の全てのサービス、即ちサービスプロパティの組み合わせごとの情報を管理することとなる。この場合、条件を満たすサービス提供機器の検索に時間を要すると考えられるため、ノード間での負荷分散も考慮してサービスプロパティの集約を行う。

サービス要求はこのようにして SPFC 間での転送が繰り返された後、サービス要求に合致するサービスを提供するサービス提供機器の直上の T-SPFC にたどり着く。ここで T-SPFC が割当てを行う場合、この T-SPFC のアドレスと共にセッションの確立がサービス要求機器に伝えられ、次小節で述べるサービス需給制御に入る。

電力の割当ては最終的には全て発電機直上の T-SPFC で実行される。もしも複数個所での割当てを許可すれば、割当て処理の高速化は可能となるが、1kW の発電しか行っていない発電機に対して割当てを行った消費機器の消費電力の総和が 1.2kW になるなど、一貫性が失われる恐れがある。本研究で提案しているサービスは課金も行うこともあり、ある発電機の発電電力に対する割当てを 1 個所でのみ行うという単純なルールではあるが割当ての一貫性を維持することは極めて重要である。

階層最上部でもサービス要求を満足する発電機を発見できない場合、要求はサービス要求に記された既定の発電事業者に配送され、割当てられる。この後、消費機器はサービスの必要性に応じて消費電力の削減を行ったり、異なるサービス要求に切り替えたりする。これらのルールは、サービス要求機器が保持しており、T-SPFC が割当て結果をサービス要求機器まで届け、それに応じて消費機器が自身の制御を行い運転状態を変化させることによる消費の制御や他のサービス要求への変更、あるいはサービス受給を期待して同様の要求を続けるといった選択を行う。

このように本研究の想定ではサービス要求機器の消費電力をいつでも自由に変えたり、サービスの受給条件さえ満たしていれば要求するサービスを変化させることが出来る。これは、あくまでも電力サービスは消費に合わせて需要側で需給の調整を図るべきであり、消費側には選択の自由があるべきであるとの観点からである。

ただし、1 つだけ現在のわが国の電気制度とは異なる点がある。現在わが国で自由化された範囲で顧客を獲得し、発電と小売を行う事業者を特定規模電気事業者 (Power Producer and Supplier, PPS) と呼ぶ。これらの事業者には 30 分同時同量義務が設定さ

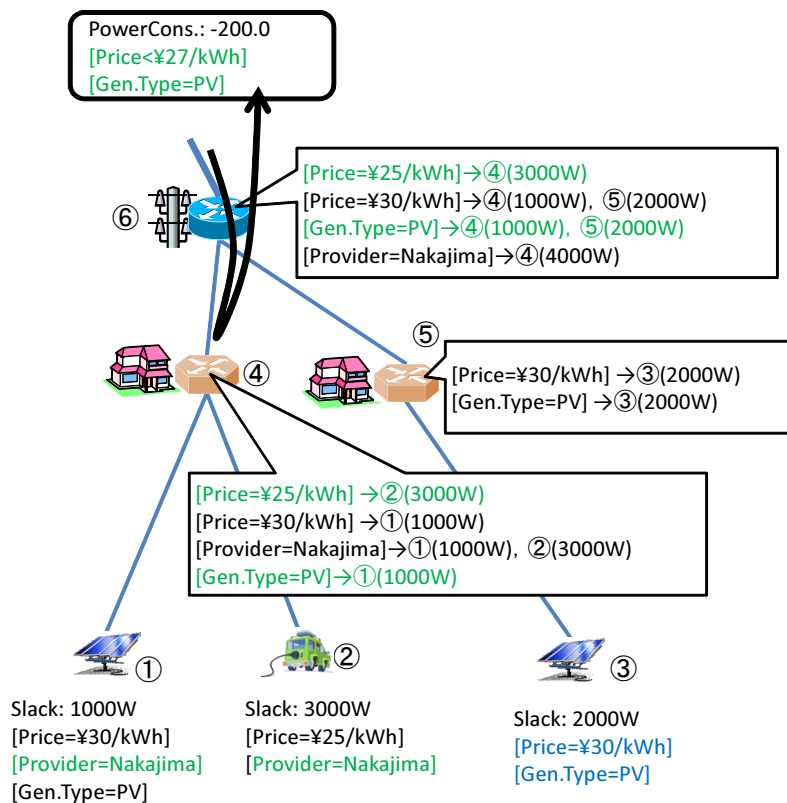


図 3.11 広告情報の集約によりサービス要求のルーティングが失敗する例

れており、各事業者の獲得した顧客の総消費量と各事業者のは発電量をの差を 30 分単位で 3% 以内にしなければならない。これに違反した場合には一般電気事業者（電力会社）にインバランス料金を支払わなくてはならない。電力の需給一致の観点から

即ち、サービス提供機器には全てのサービス要求機器に対して必ずサービスを提供しなければならないという義務は課されない。サービス要求機器は要求しても需給不可能なサービスに対して、制度レベルでは了承しなくてはならない。これは、現行の制度レベルの義務をサービス提供サイドに課することは分散型電源や電気自動車を用いた多様なサービスの繻子元を阻害する要因となるとの考えからである。

ただし、このような電気事業の制度設計は本研究の範囲を逸脱すると考えられるため、本研究では上記のような制度設定のもとでサービス要求のルーティングや割当てを行うとするに留める。異なる制度のもとで本研究の提案するようなサービスを実威厳する場合も、割当てに不足が生じた場合の要求のルーティング方式に差が発生するだけであり、本論文で述べる設計に若干の変更を加えるだけで適用可能である。

3.4.3 サービス需給制御

サービス要求が T-SPFC にルーティングされ、割当てが実行されると、その T-SPFC のアドレスと共にサービス要求機器の直上の T-SPFC に割当ての結果が返却される。これによりサービス要求機器直上の T-SPFC とサービス提供機器直上の T-SPFC の間でセッションが確立され、以後はこのサービス要求機器のサービス要求は直接この T-SPFC のアドレスに送信される。

なお、本研究ではこれ以後もサービス要求は宛先の指定方法が異なるだけでサービス要求解決機構、即ち SPFC ネットワークを通じてサービス提供機器側の T-SPFC に送られることを想定しているが、セッション確立中はそのような必要はなく、相手の T-SPFC で電力割当てを行っているプロセスにサービス要求が届きさえすれば、その間の通信方法は問わない。

T-SPFC はサービス要求を、その要求に合致する発電機ごとに集計する。この集計値を元に一定時間ごとに発電機の出力を制御し、セッション確立された機器間でサービスごとの需給一致を実現する。

セッション確立中にも、発電機の発電量や消費機器の消費量は常に変動する。これにより、セッション確立中のサービス要求機器に十分な電力を供給不可能となった場合には、供給不可能量を各機器に比例配分し、不足分を割当て結果に含めて各サービス要求機器に返送する。

この不足分の割当て結果を受け取った T-SPFC は、再びその不足分に関するサービス提供機器を探索する。具体的には、不足分と同量の消費電力量を含めたサービス要求を、セッション情報を含めずに、即ちセッション相手の T-SPFC のアドレスを含めずに再び SPFC に対して送信する。これを受け取った SPFC は要求サービス名に従ってルーティングを行っていき、サービス要求に合致するサービスを提供するサービス提供機器があれば最終的にその直上の T-SPFC までサービス要求が送り届けられ、その T-SPFC と再びセッションを確立する。もし見つからなかった場合の処理は、3.4.2 で述べたものと同様である。

また、全ての割当て結果はサービス要求機器直上の T-PFC に返却された後さらにサービス要求機器にまで配送され、3.4.2 で述べたように、サービス要求機器の自身の制御による消費量の調整やサービス要求の変更に利用される。

3.5 おわりに

本章では、第2章で得られた機能要件を元に分散型電力割当てプラットフォームの設計を行った。プラットフォームを構成する2つの機構のうち、サービスリスト提供機能を提供するサービスレジストリは現在の技術で十分可能である。プラットフォームのもう1つの構成要素であるサービス要求解決機構はサービス提供機器探索機能とサービス需給制御機能を提供する。この機構では配電網の階層構造に従って配置された SPFC が、広告されたサービス情報に従ってサービス要求を動的かつローカル優先にルーティングする。これによりサービス提供機器の変化に透過的なサービス要求及び地産地消指向の需給制御が実現される。サービス要求は、名前管理機構が定めるルールでサービス要求者が自由に記述することが出来るため、サービス要求者ごとの要望をきめ細やかに反映可能である。

次章では、コンセプト例証の目的で実装したサービス要求解決機構の実装について述べる。

第 4 章

サービス要求解決機構の 実装

4.1 はじめに

筆者らは第3章で述べた設計に基づき、サービス要求解決機構の実装を行った。実装の目的はプラットフォームを用いて実現されるサービスのコンセプト例証である。まず、4.2 で実装したシステムの全体像を概観する。次に、4.3 でシステムにおける SPFC の動作を交換されるメッセージや保持するテーブルと共に述べる。

4.2 実装の全体像

実装したシステムの全体像を図4.1に示す。本システムは、第2章で述べたサービスシナリオを再現する形で簡略化されたミニチュア配電網として構成されている。

実装したシステムでは、SPFCは1台のノートPC上でC++で書かれたプログラムと

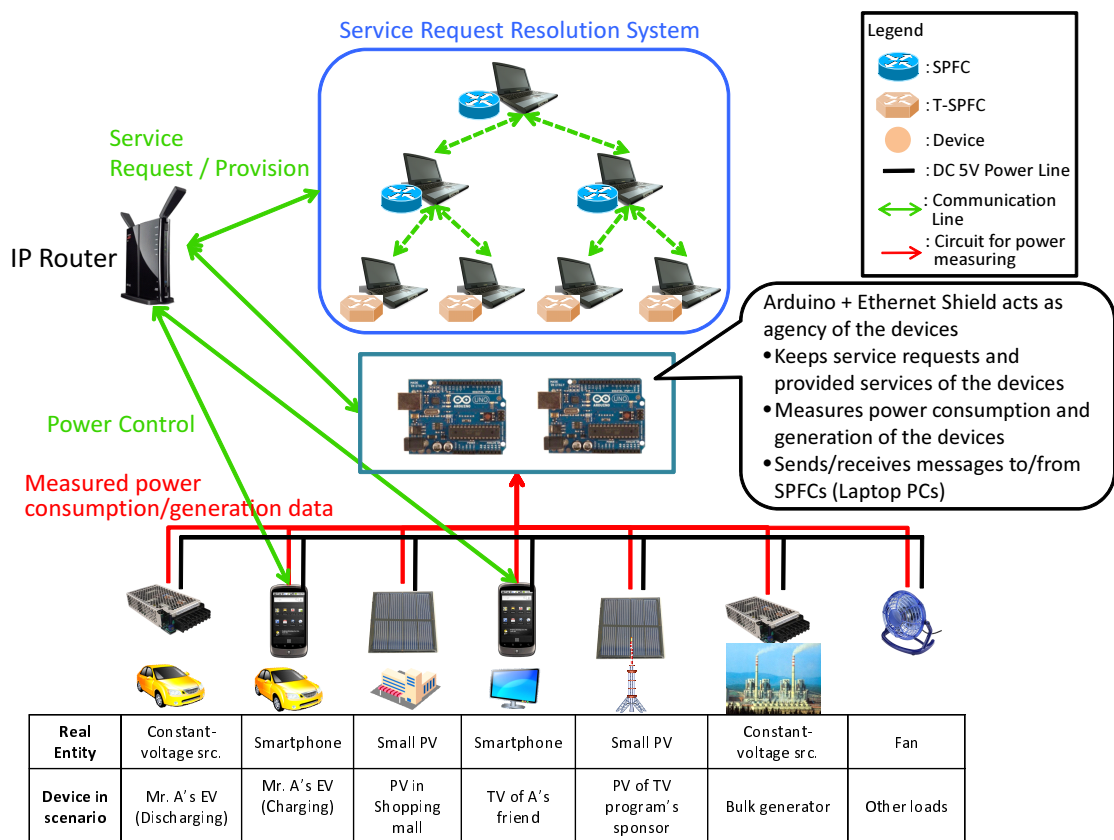
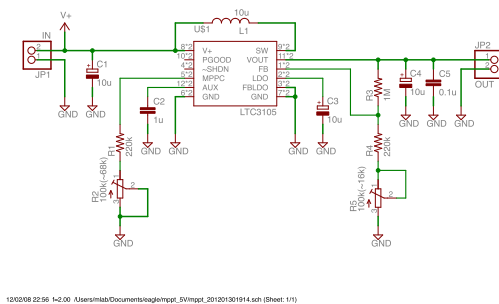


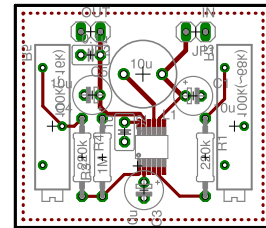
図 4.1 実装したシステムの全体像

して動作する．SPFC は 7 台あり，図に示すような階層構造をなしている．これらのノート PC は全て共通の IP ルータに接続され，LAN を構成している．ノート PC 間の通信は，階層内で直接接続されていても実際にはルータを介して通信する．即ち，SPFC の階層構造は LAN 内のオーバレイネットワークとして構成されている．

機器は，図に示すように 7 つの機器がそれぞれ代替機器で表現されている．具体的には，放電中の A さんの電気自動車および一般的な火力発電所として定電圧源，充電中の A さんの電気自動車および A さんの友人のテレビはスマートフォン，ショッピングモール及び A さんの友人が視聴していた番組のスポンサーの所有する太陽光発電システムを太陽電池，その他の負荷として扇風機がある．電気自動車を模擬する 2 つの機器は実際には両方同時に接続されることは無い．なお，小型の太陽電池には図 4.2 及び図 4.3 に示す MPPT 回路が取り付けられてある．



120208 22:56 4-2.00 4:58am\lab\Documents\agilemppt_5Vmppt_2013011914.sch (Sheet: 1/1)



120208 22:56 4-2.70 4:58am\lab\Documents\agilemppt_5Vmppt_2013011914.brd

図 4.2 MPPT 回路のスキーマ

図 4.3 MPPT 回路の基板配線図

これらの機器は共通の 5V 直流線で接続されており，これが配電線を模擬している．ただし，実際の配電網上にある変圧器や系統安定化の装置は省略されている．

全ての機器の消費 / 発電電力は，マイコンと入出力ポートを合わせた Arduino に Ethernet Shield を接続した機器によって計測され，イーサネットに接続された IP ルータを介して T-SPFC を模擬したノート PC に報告される．なお，本研究の想定では各機器が要求 / 提供するサービスや受給できなかった際のルールなどは，各機器が保持しているが，本実装では Arduino において静的にそれらの情報を保持している．Arduino が状況に応じて要求 / 提供サービスを変えることで機器の動的なサービス変更を模擬する．

機器のうち，スマートフォンだけはルータからの指令によって画面の輝度を調整することで消費電力が調整可能となっている．これらはそれぞれ電気自動車の充電速度とテレビの輝度調節によって消費電力を調節することに対応している．

システムに登場するサービスとその趣旨の一覧と，各機器が要求 / 提供するサービスの一覧をそれぞれ表 4.1 及び表 4.2 に示す．

表 4.1 システムに登場するサービス

サービス名	趣旨
(1) ショッピングモールナカジマ無料充電サービス	ショッピングモールに滞在中のお客様の電気自動車を無料で充電するサービス
(2) イシダ電力	大型の火力発電所から安価な電力を供給するサービス
(3) A さんの友人限定供給サービス	A さんの友人が所有する機器のみに安価に電力を供給するサービス
(4) テレビヨネカワエコウォッチサービス	テレビヨネカワの特定の番組を視聴中のテレビに安価に電力を供給するサービス

表 4.2 各機器の要求 / 提供するサービス

	電気自動車	ショッピングモール PV	友人のテレビ	番組スポンサーの PV	イシダ電力	その他の負荷
要求サービスの優先順位	1.(1) 2.(2)	—	1.(4) 2.(3)	—	—	Any
提供サービス	(3)	(1)	—	(4)	(2)	—

Arduino によって計測された各機器の発電電力や消費電力は，要求サービスや提供サービスが付加され，2 つの T-SPFC のいずれかに送信される．広告の伝播と要求のルーティングの結果，2 つの T-SPFC はそれぞれ自身の配下の発電機とセッションを確立した機

器の間で電力割当てを行う。割当て結果の情報を利用して、システムは図 4.4 に示すような画面を表示する。

4.3 SPFC の動作

本節では、実装したシステムの中で交換される 4 種類のメッセージを受け取った際、各 SPFC または T-SPFC がどのような動作を取るのかを中心に述べる。4 種類のメッセージとは、直下の SPFC から送信されるサービス広告、セッション未確立のサービス要求、セッション確立後のサービス要求、割当て結果の通知である。

4.3.1 SPFC

SPFC が子ノードからサービス広告を受信した際は、自身の持つサービスプロパティテーブルを更新する。サービスプロパティテーブルのデータ構造を図 4.5 に示す。

まず、受け取った子 SPFC に関する情報をサービスプロパティテーブルの中から全て消去する。

続いてサービス広告内の各サービスプロパティごとに以下の処理を行う。

1. まず、サービス広告に該当するサービスプロパティがテーブル含まれるかを確認する。

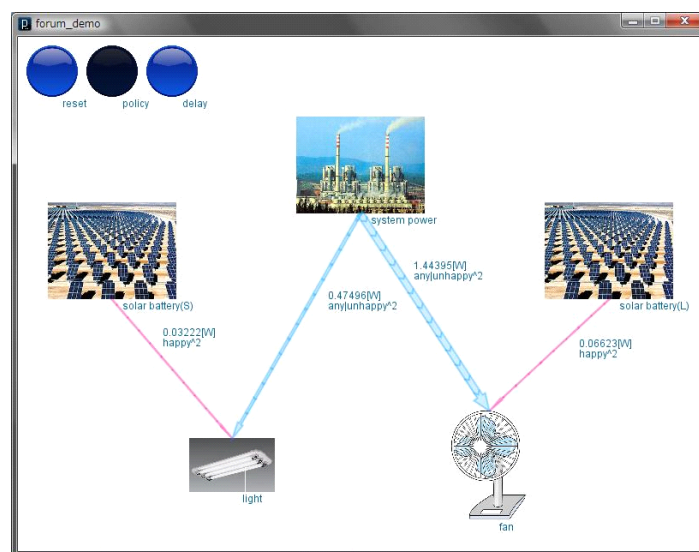


図 4.4 T-SPFC が表示する割当て結果（表示されている機器は本実装のものと異なる）

2. 含まれる場合は，その Child node's info. フィールドに受信したプロパティの送信元アドレスがあるかを確認し，あればその Slack フィールドを更新する．なければ新たにそのアドレスと Slack の値を加える．受信したサービス広告内のサービスプロパティがテーブルに含まれない場合は，新たにエントリを作成する．

全てのサービスプロパティについてテーブルの更新を終えたら，テーブル内の各プロパティについて Slack の総和を取り，それらを自身のサービス広告として直上の SPFC に送信する．この際，更新のない情報に関しても送らなければならない．

SPFC がセッション未確立のサービス要求を受信した際は，保持するサービスプロパティテーブルに従ってそのサービス要求を転送する．具体的には，サービス要求に含まれるサービスプロパティそれぞれについてそのプロパティを報告してきている直下の SPFC のリストを抽出する．その後更に全てのリストに含まれる SPFC の ID を抽出する．この際，ある ID について異なるサービスプロパティに異なる Slack の値が登録されている場合はそれらのうち最も小さい値を採用する．こうして抽出された SPFC ID のリストが候補 SPFC であるため，その中で最も多くの Slack を報告している SPFC に要求を転送する．

SPFC がセッション確立後のサービス要求を受信した際は，図 4.6 に示す SPFC ルー

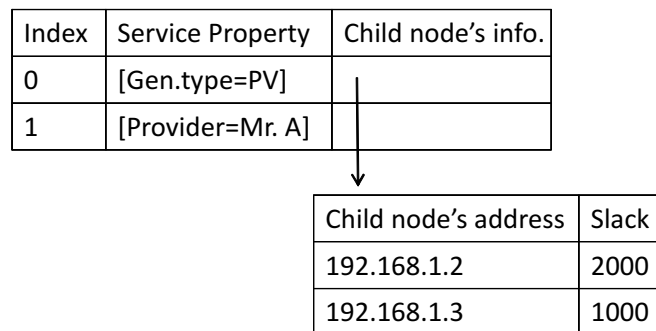


図 4.5 サービスプロパティテーブルの構造

Index	Destination address	Next address
0	192.168.1.4	192.168.1.2
1	192.168.1.6	192.168.1.3

図 4.6 SPFC ルーティングテーブルの構造

ティングテーブルに従ってサービス要求を転送する．これは，通常の IP ルーティングと同様のものである．

SPFC が割当て結果の通知を受信した際は，記載されている宛先 T-SPFC を SPFC ルーティングテーブルに参照し，割当て結果を転送する．

4.3.2 T-SPFC

T-SPFC がサービス広告を受信した際の処理は，その送信元が SPFC ではなく機器であるという違いはあるものの，サービスプロパティテーブルの処理の仕方は SPFC と同様である．サービスプロパティテーブルの処理の後，図 4.7 に示す発電機情報テーブルを更新する．

T-SPFC がセッション未確立のサービス要求を親 SPFC から受け取った際は，まず自

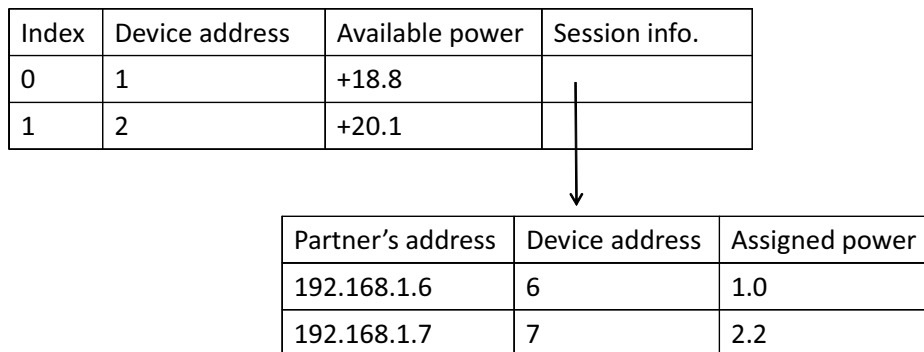


図 4.7 発電機情報テーブルの構造

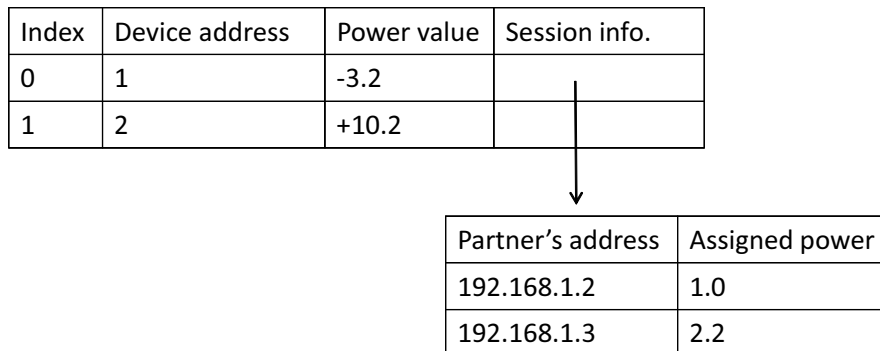


図 4.8 消費機器情報テーブルの構造

身のサービスプロパティテーブルと照合して条件に合致するサービスを提供している発電機があるか否かを調べる。

合致するものがあれば、このサービス要求を受け入れ、セッションを確立する。具体的には、発電機情報テーブルにセッションの情報を書き加えて割当て結果を T-SPFC に返送する。もし割当てを完全に行うことが出来なければ要求量を修正して直上の SPFC に返送する。

合致するサービスを提供している発電機がなければ、サービス要求を直上の SPFC に返送する。

T-SPFC がセッション確立後のサービス要求を親 SPFC から受け取った際も、まず自身のサービスプロパティテーブルと照合して条件に合致するサービスを提供している発電機があるか否かを調べる。合致するものがあれば割当てを行って、割当て結果を返送する。合致するサービスを提供している機器がなければ、割当てに失敗したという割当て結果を T-SPFC に返送する。セッションを確立しているにも関わらずそのサービスを提供している機器がないというのは、発電機が提供しているサービスを変更した場合にのみ起こる。

T-SPFC が割当て結果の通知を受け取った際は、それを対応する機器に転送すると共に、図 4.8 に示す消費機器情報テーブルを更新する。

T-SPFC が消費機器からサービス要求を受け取った際は、まずその機器がセッションを確立しているか否かを確認し、セッション確立済みのサービス要求またはセッション未確立のサービス要求に整形して一度自分に送信する。これにより 1 つの T-SPFC 内でセッションが確立されている場合の処理が可能となる。

4.4 おわりに

本章では、SPFC および T-SPFC が各種のメッセージを受信した際に保持するテーブルの情報をどう更新するかを説明する形でサービス要求解決機構の実装について述べた。実装したミニチュア配電網では、サービスシナリオに登場した 4 つのサービスを模擬的に実現可能である。今後も実装を拡張する形で、より多様なサービスの実現が可能であることを例証していく予定である。

第 5 章

関連研究

5.1 はじめに

本章では、本論文で設計及び実装を行った分散型電力割当てプラットフォームについて、サービス発見・名前解決、電力割当て、電力網の管理・運用・制御アーキテクチャという観点から関連研究について述べる。

5.2 サービス発見・名前解決

本研究は、ネットワークにおけるサービス発見技術を電力サービスに応用した研究と考えられる。本研究が対象とした電力網では、電気自動車など各種機器の移動や再生可能エネルギー電源の出力変動、消費機器の電力によりサービス提供機器が動的に変化することとは第 2 章で述べた。これは、ネットワークサービスにおいてサービスモビリティをサポートするという事に他ならない。

一般に、ネットワークでのデータ配送のためには、サービス名やドメイン名などの「名前」を指定し、それをネットワーク上でのアドレスに解決し、そのアドレスから目的とするエンティティまでの経路を得ると言う手順を踏む [11]。

サービスモビリティサポートのため、サービスの名称に従ってメッセージを配送する機構を取り入れた研究として Intentional Naming System [10] や STONE [12, 13] がある。これらの研究では、ネットワークに接続する多数のモバイル機器が移動する際に、継続したサービス提供を行うためにサービス名からネットワークアドレスへの名前解決とサービスに必要なデータ（必要な情報のクエリ、動画像など）の配送を同時に行う Late binding 型の機構を採用している。

DNS はその誕生以来、ホスト名と IP アドレスのマッピングを行うという重要な機能をインターネットに提供してきた秀逸なネームサービスである。管理組織名による名前空間のサブドメインへの分割、名前解決機構のサブドメインごとの負荷分散という手法で現在も稼働しているものの、一方で現在の Web アプリケーションの単一障害点ともなっている。

DNS はホスト名と IP アドレスの対応は比較的静的であるという重要な仮定のもとに負荷分散が成り立つ。本研究で述べたような動的な環境での運用は望ましくないことが明示され [14]、新たな名前解決に関する研究は既に行われている [15, 16]。本研究はこれらのアプローチも参考にしており、サービス発見や名前解決の手法自体に新規性があるわけではない。将来の電力網におけるサービスを考え、そこにこれらの研究が適用可能である

ことに着目した点に新規性がある。

5.3 電力割当て

本研究では、一度電力網に入れば物理的には区別することが出来ない電力に対し、仮想的な割当てを行い、対象となった機器に需給制御を行うことで整合性を保っている。

このように、電力の区別を行うという考え方は元来、電力網の安定性を評価するためにも行われてきた [17, 18]。これらの研究では、系統の事故時に各線路をどれだけの電力が流れるかを予め予測したり、発電事業者が送電事業者に託送料として支払うべき価格を算出するのに用いられる。これに対し本研究ではサービス要求とサービス提供の情報に基づき、恣意的に電力割当てを行う。

目的は電力サービスの提供とは限らないものの、電力割当てと同様のことを実現可能な研究としてはスイッチング・アレイを用いて物理的に電力の回線を変化させる研究 [19] や、電力をパケット化してヘッダの情報から行き先を変化させる研究がある [20, 21]。これらは非常に革新的なアイデアではあるものの、大電力への対応、スイッチング速度、電力損失の観点からまだまだ課題は多く、現状としては家庭内での実験やコンセプト提案に留まっている。特に電力損失の課題は重大であると筆者は考えている。現在の送配電で 5% 程度の電力が失われることさえ問題視されているのに対し、家庭内、あるいは電力系統に大量のパケット処理ルータを導入することはこの損失を大きくすることとなる。上記の研究では未だルータにおける損失の評価はなされていないが、パケット電力の損失を回路シミュレーションによって評価している研究 [22] もあり、それによれば 12% という大きな電力がこの過程で失われることになる。

5.4 電力網の管理・運用・制御アーキテクチャ

本研究はサービス提供機器-サービス要求機器間で需給制御も行うため、地域エネルギーマネジメントシステム (Community Energy Management System: CEMS) の 1 つと考えることが出来る。ただし、現在研究の進められている一般的な CEMS の目的が熱電併給などを考慮した需給制御による効率的な系統運用であるのに対し、本研究の目的はサービスの提供である点異なる。

CEMS の研究として [23] がある。この研究では将来のサービスに備えて需要家の消費情報などを提供するインタフェースの検討も行っているが、具体的なサービスとしては需要家への電力消費の見える化のみである。本研究で述べたサービスでは、このような

CEMS のインタフェースを介して行うことも可能と考えられるが、このインタフェースが発電機を含む機器の制御やサービスの提供機器の変化に透過的なサービスの実現を可能としているのかは明らかにされていない。

電力網を中央集中制御型ではなく、ゆるく結合された無数の小規模な電力網として扱う試みもなされている。このような小規模な電力網はマイクログリッドと呼ばれ、電力網をの自律分散的な制御アーキテクチャが提案されている [24]。

5.5 おわりに

本章では、サービス発見・名前解決、電力割当て、電力網の管理・運用・制御アーキテクチャという 3 つの観点から本研究の位置づけを述べた。本研究で述べたプラットフォームは、これらの研究領域を横断しながら、単に安定化や高効率化のみを追及しない新たな電力網の在り方を実現するものである。

第 6 章

結論

6.1 本研究の主たる成果

本論文では、分散型電源や電気自動車的大量に導入された電力網において、多様な電力サービス実現に向け、最も重要な機能である電力の割当てを行うプラットフォームの設計と実装を行った。

本研究の主たる成果は以下の 3 つである。まず、今後の電力網に大量に導入されるであろう分散型電源や電気自動車を用いて実現が期待されるサービスを明らかにしたことである。既に電源の選択を可能とするサービスや、グリーン電力証書の発行など、電力に仮想的な価値を与えるサービスや枠組みは存在するが、それだけにとどまらず消費機器と発電機の間で相互に条件指定を行うことでより多様なサービスが実現されることを示した。このようなサービスを実現によってショッピングモールの経営者、ソフトウェアベンダ、テレビ番組のスポンサーなど様々な事業者が電力の供給に興味を示し、新たなビジネスモデルを生み出す可能性があると考えられる。

2 つ目の貢献は、上記電力サービスを実現可能とするための機能要件を、電力網の特性を考慮して明らかにしたことである。具体的な要件としては、消費機器の使用状態の変化、電気自動車など機器の移動、再生可能エネルギー電源の出力変動によるサービス提供機器及びその提供可能な量が常に変動するため、そのような変化に対して透過的な電力サービスの要求が可能であることがまずあげられる。次に、多様な需要家の要求に応えるために柔軟性の高いサービス記述が必要であることがある。最後に、配電損失低減、配電電圧維持の観点から地産地消指向の需給制御を行うため、ローカル優先のサービス提供機器探索を行うことが望ましいことがあげられる。これは、配電網への必要な投資量を抑制することに貢献する。

3 つ目は、抽出した機能要件を満足するプラットフォームの設計を示し、その実装を行うことで新たな電力サービスのコンセプト例証を行ったことである。設計では、サービス提供機器の変化に透過的なサービス要求を行うため、サービス名の解決と消費電力の配送を同時に行う Late binding 型のルーティングと、セッション確立後のアドレス指定型のルーティングを併用した。また、サービス要求機器は名前管理機構の定めるルールの下で自由なサービス要求を行うことが可能である。このサービス要求を、電力網の階層構造に従って配置された SPFC がローカル優先でルーティングすることで、需要家の要求を尊重しながらも可能な限り狭い範囲での需給一致を実現する。

6.2 今後の課題

将来の電力網上で魅力的なサービスを実現するという本研究の目標に向けては、以下の課題が考えられる。まず、本システムの定量的な評価を進めることがあげられる。具体的には、サービスの種類数、電気自動車や家庭用蓄電池、分散型電源の導入量等をパラメータとし、各 SPFC におけるサービス名解決の速度やルーティングによる遅延を評価することが考えられる。この遅延は本システムのリアルタイム性を表す。電力の使用時間がごく短い機器へのサービスを実現するためには、この遅延を数秒以内にすることが必要だと筆者は考えている。

次に、本設計では電力網の制御回線を利用することを念頭においたが、インターネット上でオーバレイネットワークを構築するような全く異なる設計も考えられる。評価の際にはそういった設計との比較を行う必要があると考えられる。

■ 謝辞

本研究を進めるにあたり，研究の内容に関してご指導頂いたのみならず，研究に対する姿勢や広く社会について，日頃からご指導，ご鞭撻頂きました森川博之教授に深く感謝いたします．森川先生のポジティブな意見は研究を進める上での唯一の救いでした．日本語の文章やスライドの細かいこだわりなど，今後の人生に活かしていきたいと思います．

現在は森川研究室の所属ではありませんが，南正輝先生には何よりもまず，STONE という非常に興味深い研究を残して下さったことに感謝いたします．STONE によって本研究はサービス発見と結び付けました．また，名前解決というネットワークにおいて極めて重要な機構について調査する足がかりともなりました．深く感謝いたします．

常日頃から研究について指導をして下さった鈴木誠特任助教授に深く感謝いたします．本研究は鈴木先生の助言なしでは成り立ちませんでした．また，本研究の本格的な方向性を決めたのは，鈴木先生の「機器別に電気代を設定する」というアイデアからでした．このアイデアを膨らませ，本研究はここまで来ました．

博士課程3年の石田繁巳さんにも，全面的に研究の相談に乗っていただきました．本研究での私の悩みを最初に共有していたのはいつも石田さんでした．深く感謝いたします．

学部生の米川君は，コンセプト実装の回路周りやサービス発見や設計の問題点などに関する議論を共にしてくれました．深く感謝しています．

助教授の猿渡俊介先生との会話は，いつも私に前向きな気持ちをもたらせてくれました．また，Intentional Naming System という重要な関連研究を最初に紹介して下さったのも猿渡先生でした．本当に深く感謝いたします．

また，研究を行う環境の整備に尽力して頂きました秘書の川北敦子さん，石崎智子さんには，深く感謝いたします．

同期の角田君，岩元君，菅沼君，高君とは研究に限らず様々な話をしました．研究室での気分転換にも協力してもらい，本当に感謝しています．共に研究室で議論し，励まし合うことで2年間の研究生活を生き抜くことができました．

このほかにも，直接名を挙げることはいたしません，研究室のOB・OG 含め多くの研究室内外のメンバーにさまざまな形でお世話になりました．最後に，この研究室で3年

間の研究生生活を過ごせたことに感謝いたします。研究生生活は長く辛い日々でしたが、その分非常に多様な経験・知見を得られました。ありがとうございました。

2012 年 2 月 8 日

参考文献

- [1] Y. Miyamoto and Y. Hayashi, “Evaluation of improved generation efficiency through residential pv voltage control of a clustered residential grid-interconnected pv,” IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), pp.1–8, Oct. 2010.
- [2] I. Leisse, O. Samuelsson, and J. Svensson, “Electricity meters for coordinated voltage control in medium voltage networks with wind power,” IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), pp.1–8, Oct. 2010.
- [3] S. Han, S. Han, and K. Sezaki, “Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol.1, no.1, pp.65–72, Jun. 2010.
- [4] K.M. Liyanage, A. Yokoyama, Y. Ota, T. Nakajima, and H. Taniguchi, “Impacts of communication delay on the performance of a control scheme to minimize power fluctuations introduced by renewable generation under varying V2G vehicle pool size,” First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Oct. 2010.
- [5] M. Parvania and M. Fotuhi-Firuzabad, “Demand response scheduling by stochastic SCUC,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol.1, no.1, pp.89–98, Jun. 2010.
- [6] A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, “Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol.1, no.2, pp.120–133, Sep. 2010.
- [7] 山本草詩, 石井大介, 岡本聡, 山中直明, “電力需要平滑化型スマートグリッドネットワークアーキテクチャとそのスケジューリングアルゴリズムの提案,” 電子情報通信学会技術報告, vol.111, no.PN2011-20, pp.45–50, Oct. 2011.
- [8] G.W. Neufeld, “Descriptive names in X.500,” Symposium proceedings on Communications architectures & protocols, Aug. 1989.
- [9] J. Taneja, D. Culler, and P. Dutta, “Towards cooperative grids: Sensor/actuator

- networks for renewables integration,” First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp.531–536, Oct. 2010.
- [10] W. Adjie-Winoto, E. Schwartz, H. Balakrishnan, and J. Lilley, “The design and implementation of an intentional naming system,” SIGOPS Operating System Review, vol.33, pp.186–201, Dec. 1999.
 - [11] B.M. Hauzeur, “A model for naming, addressing, and routing,” ACM Transactions on Office Information Systems, vol.4, no.4, pp.293–311, Oct. 1986.
 - [12] 南正輝, 杉田馨, 森川博之, 青山友紀, “ユビキタス環境に向けたインターネットアプリケーション プラットフォーム,” 電子情報通信学会論文誌 (B), vol.85, no.12, pp.2313–2330, Dec. 2002.
 - [13] 南正輝, 森川博之, 青山友紀, “ユビキタス環境におけるサービス合成支援のためのインターフェース指向ネームサービス,” 電子情報通信学会論文誌 (B), vol.86, no.5, pp.777–789, May 2003.
 - [14] J. Klensin, “Role of the domain name system (DNS),” IETF, RFC 3467, Feb. 2003.
 - [15] P. Pääkkönen, N. Akhtar, R. Campos, C. Kappler, P. Pöyhönen, and D. Zhou, “Scalability of name resolution for ambient networks,” Proceeding of the 4th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2006), May 2006.
 - [16] V. Ramasubramanian and E.G. Sirer, “The design and implementation of a next generation name service for the internet,” Proceedings of the ACM conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (SIGCOMM), pp.331–342, Aug. 2004.
 - [17] J.W. Bialek, “Tracing the flow of electricity,” IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol.143, no.4, pp.313–320, Jul. 1996.
 - [18] 諏訪三千男, 岩本伸一, “無効電力と調相機器に重点を置いた電源別色分け手法,” 電気学会論文誌 (B), vol.124, no.4, pp.537–545, Apr. 2004.
 - [19] T. Shibata, K. Sakai, and Y. Okabe, “The design and implementation of an on-demand DC grid in home,” IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT), pp.152–159, Jul. 2011.
 - [20] T. Takuno, M. Koyama, and T. Hikiyama, “In-home power distribution systems by circuit switching and power packet dispatching,” First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp.427–430,

Oct. 2010.

- [21] R. Abe, H. Taoka, and D. McQuilkin, “Digital grid: Communicative electrical grids of the future,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.2, no.2, pp.399–410, Jun. 2011.
- [22] 井上淳, 藤井康正, “パケット電力取引に基づく革新的配電システムの提案,” *電気学会論文誌 (B)*, vol.131, no.2, pp.143–150, Feb. 2011.
- [23] 前川智則, 金子雄, 寺島芳樹, 寺本圭一, 松澤茂雄, 宮崎一彦, 山田孝裕, “地域エネルギーマネジメントシステムの開発,” *信学技法*, vol.111, no.IN2011-62, pp.99–104, Jul. 2011.
- [24] K. Koyanagi, Y. Hida, R. Yokoyama, S. Nagata, K. Nakao, and T. Hirai, “Electricity cluster-oriented network: A grid-independent and autonomous aggregation of micro-grids,” *The International Symposium on Modern Electric Power Systems (MEPS)*, Sep. 2010.

■ 発表文献

- [1] T. Nakajima, M. Suzuki, S. Saruwatari, and H. Morikawa. “Design of a light-weight failure detection for earthquake monitoring,” The 3rd Asia-Europe Workshop on Ubiquitous Computing (AEWUC’10), May 2010 (Poster).
- [2] 角田仁, 中嶋毅彰, 石田繁巳, 猿渡俊介, 森川博之. “社会実装に向けたヘルスケア情報共有基盤,” 第5回人間情報学会講演会, Dec. 2010 (Poster).
- [3] 中嶋毅彰, 米川慧, 石田繁巳, 鈴木誠, 森川博之. “多様なサービス電力の発見・割当て・制御機構,” 電子情報通信学会総合大会, Mar. 2012, 投稿済