

磁気共振を用いた非接触給電における 複数端末への高効率な給電手法

関邦洋[†] 湯素華[†] 小花貞夫[†]

概要: モバイル端末や自律ロボットの普及に伴い、それらの半永久的な稼働が望まれている。これまで主流であった有線給電は給電場所が限られるため、近年非接触給電が提案されている。その中でも伝送可能な距離が比較的長くかつ電力効率が良い、磁気共振を用いた非接触給電が注目されている。しかしながらこの給電方式については、主に1対1の環境下における研究はなされてきたが、1対多の給電方式はほとんど検討されてこなかった。

筆者らは、磁気共振を用いた非接触給電における複数端末への給電時間の少ない高効率な給電を可能とするための手法を検討し、基本的な評価を行った。具体的には、まず予備実験により、送電機からの距離に基づく受電端末のグループ分けを行ない、グループ毎に給電することが給電時間の短縮に効果があるという知見を得た。これに基づいて受電端末のグループ分けを行うアルゴリズム、ならびに同じグループ内の端末及びグループ間での給電のスケジューリングを行う方式を提案した。シミュレーション評価を通じて、提案方式により送受電力効率を維持して、給電時間を約12%短縮できることを確認した。

キーワード: 非接触給電, 磁気共振, 複数端末給電,

Studies on Efficient Wireless Power Transfer to Multiple Terminals via Magnetic Resonant Coupling

KUNIHICO SEKI[†] SUHUA TANG[†] SADA OOBANA[†]

Abstract: To make it possible for mobile devices and autonomous mobile robots to work continuously without power shortage, it becomes important to provide contactless power supply to these devices. Magnetic Resonant Coupling (MRC), as a promising wireless charge method, has attracted much attention recently, because it achieves a high power efficiency within a short or medium range. Research in this area, however, mainly focuses on the charge of single device, and little attention has been paid to the wireless charge of multiple devices.

In this paper, how to charge multiple devices based on the MRC technique is studied. First, by preliminary experiments, it is found that by grouping devices based on their distances from the power transmitter and separately charging each group, sometimes it is possible to shorten the charge time compared with the case where all devices are charged simultaneously. Then, an algorithm is proposed for dividing devices into groups, and on this basis, another algorithm is suggested for scheduling the charge of devices inside each group. Simulation evaluations confirm that the proposed algorithms help to reduce the charge time by about 12% meanwhile maintaining the same power efficiency.

Keywords: Wireless Power Transfer (WPT), Magnetic Resonant Coupling (MRC), Multi-terminal WPT

1. はじめに

昨今モバイル端末や自律ロボットなどの普及に伴い、それらの半永久的な稼働が望まれているが、これまで主流であった有線給電は給電可能な場所が限られ、また、断線や感電のリスクがある。その為、非接触給電の各種方式が提案されている[1]。従来からの手法では伝送効率が極めて低いか、伝送可能な距離が極めて短い、または制御が極めて困難[2]などの問題を持つために実用には難しいことから、電磁誘導と似たシンプルな原理で動作し送電可能な距離が比較的長く、しかも送受電力効率が良い磁気共振[3]が近年注目されている。共振コイル間エアギャップが1mで送受電力効率が90%であり、また2mでも送受電力効率45-90%で60W程度の給電が可能であることが示されている。しかし、これまでは送電機に対し受電端末1台の場合の研究が主流であり

[2][4]、同時に複数台の受電端末に給電する場合の議論はほとんどされてこなかった。実環境では、給電を要求する端末が複数同時に存在する場合が十分想定される。例えば、会議室で会議参加者がテーブルの上においたスマートフォンを同時に給電する事が考えられる。

筆者らは、磁気共振を用いた非接触給電における複数端末への給電時間の少ない効率的な給電手法を提案し、基本的な評価を行った。具体的には、まず予備実験から、複数端末に給電する際に最も電力を引き出せる受電端末の組み合わせが、送電機と受電端末の距離に応じて異なることがわかった。このことから送電機からの距離に基づく受電端末のグループ分けを行ない、グループ毎に給電することが給電時間の短縮に効果があるという知見を得た。また、これに基づいて受電端末のグループ分けを行うアルゴリズム、ならびに同じグループ内の端末及びグループ間での給電の

[†]電気通信大学 大学院情報理工学研究科
Graduate School of Informatics and Engineering
The University of Electro-Communications

スケジューリングを行う方式を提案した．さらにシミュレーションにより提案方式の有効性を評価し，12%の給電時間削減を確認した．

以下，2 章では磁気共振を概説し，3 章では予備実験と結果について述べる．4 章では提案方式を述べ，5 章では提案方式のシミュレーション評価について述べる．最後に6 章で結論を述べる．

2. 磁気共振給電の概要

2.1. 非接触給電の概要

非接触給電は，物理的な接点を持たずに給電する手法であり主な手法を表 1 に示す．それぞれの手法には特徴がある．本稿では，中距離の送電が可能で人体への影響が比較的小さい磁気共振に着目する．

表 1：非接触給電の種類と特徴

	電磁誘導	マイクロ波		磁気共振
		無指向性	指向性	
距離	短距離 (～数10cm)	広範囲	長距離	中距離 (10cm～10m)
給電電力効率	○	×	○	○
人体影響	少ない	多い		少ない
制御	単純		複雑	単純
利用例	電気歯ブラシ スマートフォン ノートパソコン	観測モニタ	衛星 高高度飛行機	携帯端末 電気自動車 センサネットワーク

2.2. 磁気共振給電の概要

磁気共振は，送受電回路の周波数を共鳴させ，磁場を介して離れた場所にある給電対象に電力を伝送する方式である．この方式は数 10cm から数 m までの距離の送電が可能である．平易な説明のために音叉の共鳴現象などに例えられることが多い[6]．距離に対して適切な共振周波数を与えることにより多くの電力の伝送が可能である．加えて位置ずれに強く細かい配置の調整が不要であるという特徴がある．

磁気共振により複数の受電端末（以下，単に端末と呼ぶ）に給電する際の等価回路を図 1 に示す．実環境では，送電機/端末にそれぞれ送電/受電可能な電力に制約があるため，送電機の電源が，送電機や受電端末の電力制限($p_{tx,max}/p_{max}$)を超えない場合は表 2 に示す固定電圧とし，一方，超える場合は電源の電圧を下げることで電力の限界以内に収まるように制御する．

送電電力に対する受電電力の効率（以下，送受電効率と呼ぶ）を最大とするために，(1)式をインピーダンスマッチング[8]に用い，すべての端末に一斉に給電する際の送電電力および n 番目の端末の受電電力を，それぞれ図 1 よりキルヒホッフの法則を用いて (2) 式，(3) 式で表すことができる．

$$x_n = \sqrt{1 + \frac{(\omega h_n)^2}{r_{tx} r_n}} \quad (1)$$

$$p_{tx} = \frac{1}{2} Re\{v_{tx} i_{tx}^*\} = \frac{|v_{tx}|^2}{2} \frac{1}{r_{tx} + \omega^2 \sum_{n=1}^N h_n^2 (r_n + x_n)^{-1}} \quad (2)$$

$$p_n = \frac{1}{2} x_n |i_n|^2 = \frac{|v_{tx}|^2}{2} \frac{\omega^2 h_n^2 x_n (r_n + x_n)^{-2}}{(r_{tx} + \omega^2 \sum_{k=1}^N h_k^2 (r_k + x_k)^{-1})^2} \quad (3)$$

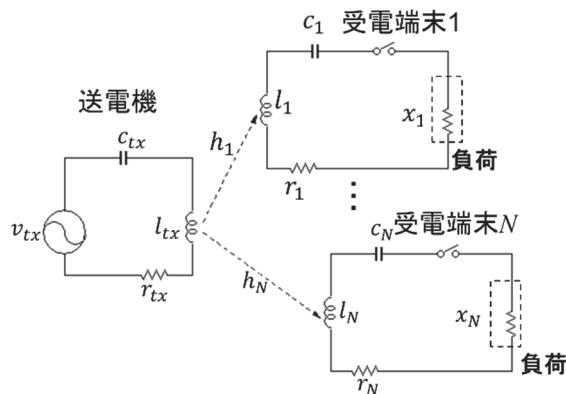


図 1 磁気共振による給電の等価回路

表 2 利用パラメータ

送電機の電圧 (V)	v_{tx}
送電機の電流 (A)	i_{tx}
n 番目の受電端末の電流 (A)	i_n
送電機の内部抵抗 (Ω),	r_{tx}
n 番目の受電端末の内部抵抗 (Ω)	r_n
n 番目の受電端末の負荷 (Ω)	x_n
送電機のキャパシタ (F)	c_{tx}
n 番目の受電端末のキャパシタ (F)	c_n
送電機の自己インダクタンス (H)	l_{tx}
n 番目の受電端末の自己インダクタンス (H)	l_n
n 番目の受電端末と送電機との間の相互インダクタンス (H)	h_n
n 番目の受電端末の角周波数 (電源周波数)	$\omega_n = 1/\sqrt{l_n c_n}^*$
送電電力限界 (W)	$p_{tx,max}$
受電電力限界 (W)	p_{max}

*但し， $\omega = \omega_1 = \omega_2 \dots = \omega_n$ とする．

3. 予備実験

磁気共振により複数端末に給電する場合の特性を確認するための予備実験を行った．

3.1. 距離と電力の関係

まず磁気共振の基本的な性質を確認するために送電機 1

台に対して端末 1 台の送受電電力の関係を図 2 に示す。送電電力に対する受電電力の効率は距離に近いほうが高い傾向があるが、受電電力にはピークとなる距離が存在し、その距離は最短距離ではないことが分かる。

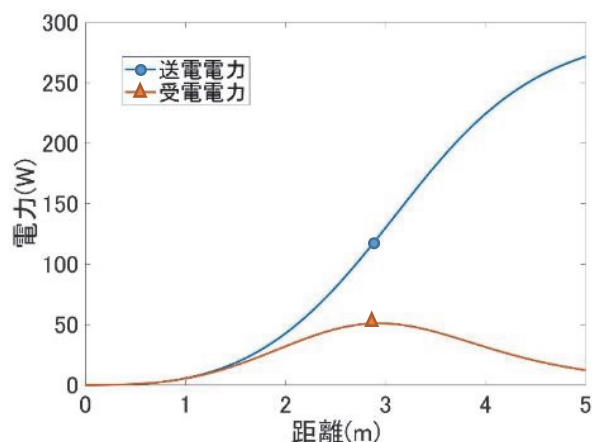


図 2：距離による送受電電力

3.2. 複数端末への磁気共振給電

送電機 1 台とそこから 1.25m の距離に 1 台の端末を固定配置し、加えて 0～3m の間をもう 1 台の移動端末が移動する際の、移動端末の位置ごとの送電機の送電電力とそれぞれの端末の受電電力を図 3 に示す。これは表 3 のパラメータを用いて理論計算により求めた結果である。以下に、図 3 より読み取れる給電の特性を述べる。

表 3：理論計算に用いたパラメータ

送電機の初期固定電圧 v_{tx} (V)	$20\sqrt{2}$
受電端末の内部抵抗 r_n (Ω)	0.0672
送電機の内部抵抗 r_{tx} (Ω),	1.344
角周波数(電源周波数)	42.6×10^6
$\omega_n = 1/\sqrt{l_n c_n}$	(6.78MHz)
固定受電端末の位置 (m)	1.25
移動受電端末の移動範囲 (m)	0～3

(1) 端末毎の受電電力の格差

複数の端末がある場合に、それぞれの端末の受電電力は送電機に近いものほど大きく、遠いものほど小さい。また、同じ距離でも他の端末との相互インダクタンスの影響により受電電力は変化する。そのため、同じ電力量の給電に必要な時間が異なり、距離に応じた端末ごとの給電時間の割り当てが必要とある。

(2) 近接端末の受電電力

上記 (1) で述べたように送電機に近い端末ほど大きな電力を受電できるが、逆に近すぎる (図 2 で 1m 以下の) 端末の場合は送電機の送電電力が小さく、端末の受電電力

も小さくなる特性が観測される。また、送電電力の減少に伴い、その他の端末の受電電力も更に下がっている。このため近すぎる端末とそうでない端末を同時に給電すると全体の送受電電力の低下を招き、結果としてより多くの給電時間を要することになると考えられる。

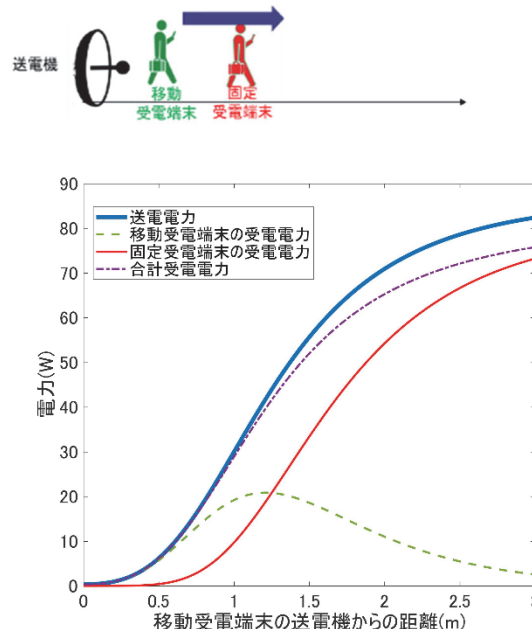


図 3：距離による送受電電力の変化

3.3. 給電手法の探求

端末の 4 通りの配置に対して、それぞれにかかる給電時間を表 4 の条件下で比較した。表 4 に記載した配置パターンは、送電機からの距離および、その距離に端末を設置した数をそれぞれ示す。給電の実行に際しては、3.1 節 (1) より、先に給電が終わった端末は給電対象から外す。表 4 で示す送電限界電力及び電源周波数のパラメータは改正電波法[10]に準拠するものとした。

表 4：計算条件

送電機の初期固定電圧 v_{tx} (V)	80
受電端末の内部抵抗 r_n (Ω)	0.0672
送電機の内部抵抗 r_{tx} (Ω),	1.344
角周波数(電源周波数) ω	42.6×10^6 (6.78MHz)
送電電力限界 $p_{tx,max}$ (W)	100
受電電力限界 p_{max} (W)	20
配置パターン 1 (2 台端末)	1m×2
配置パターン 2 (2 台端末)	50cm×2
配置パターン 3 (4 台端末)	1m×2 + 50cm×2
配置パターン 4 (2 台端末)	4m×1 + 5m×1
受電電力量目標値	5Wh

それぞれの端末配置における端末 1 台毎の受電電力、給電時間と送電電力量を表 5 から表 8 に示す。異なる距離の端末が含まれる場合、端末毎の受電電力に差が発生し、また他の端末への給電が終了することにより受電電力がさらに変化する。それらの変化を、ステップに分けて、表 9 から表 13 に示す。表中で「2 台同時」は端末 2 台を同時に給電することを指す。また「1 台ずつ」は給電を 1 台終了してからもう 1 台の端末を給電し、「4 台同時」は端末 4 台を同時に給電することを指す。「50cm 分割+1m 同時」は、最初に 50cm の端末に 1 台ずつ給電し、その後 1m の端末 2 台に同時に給電することを指す。

パターン 1 では、表 5 より「2 台同時」の方が「1 台ずつ」より給電時間が短く、送電電力量も少ない。パターン 2 では、表 6 より「2 台同時」は「1 台ずつ」と比べて送電電力量が僅かに少ないが、給電時間は大幅に増加している。パターン 3 はパターン 1 とパターン 2 の組み合わせであるため、表 7 より 1m の端末同士で「2 台同時」に給電を行い、50cm の端末は「1 台ずつ」、また 50cm の端末と 1m の端末を分けて給電する手法を組み合わせることにより給電時間が一番短くなった。一方で送電電力量は一斉に給電を行った時、即ち 4 台同時のパターンが一番小さい。これは表 9 から表 11 の配置パターン 3 のそれぞれの給電手法において、受電電力の変化を端末ごとにステップに分けたものより一斉に行くと電力が弱くなりすぎるのに対して、今回分けた方法では受電電力が小さくなるのが要因と考えられる。パターン 4 では、表 8 より「2 台同時」の方が送電電力量が小さく、給電時間も短い。これは配置パターン 4 における受電電力の変化をステップごとに示した表 12、表 13 より、5m の端末を 4m の端末と同時に給電しても 4m の端末の受電電力があまり低下しないため、分ける必要が無いと考えられる。

また、今回ステップに分けて処理を行っているのは、受電電力量目標値に達した端末を給電対象から除外しないと、受電電力量が下がることが表 9、表 11、表 13 から明らかになったためである。

これらの結果から、同時に給電する端末の組み合わせ方（グループ化）や、同じ組み合わせ内の端末を同時に給電開始し先に給電終了した端末を除外すること（スケジューリング）が重要であることが分かる。

表 5：配置パターン 1 の結果比較

	1 台あたりの 受電電力(W)	給電時間 (h:m)	送電電力量 (Wh)
1 台ずつ	20	0:30	10.41
2 台同時	11.76	0:25	10.30

表 6：配置パターン 2 の結果比較

	1 台あたりの 受電電力(W)	給電時間 (h:m)	送電電力量 (Wh)
1 台ずつ	7.03	1:25	10.06
2 台同時	1.76	2:50	10.04

表 7：配置パターン 3 の結果比較

	1 台あたりの 受電電力(W)	給電時間 (h:m)	送電電力量 (Wh)
4 台同時	表 9	4:00	20.33
1 台ずつ	表 10	1:50	20.47
50cm 分割 +1m 同時	表 11	1:05	20.36

表 8：配置パターン 4 の結果比較

	1 台あたりの 受電電力(W)	給電時間 (h:m)	送電電力量 (Wh)
1 台ずつ	表 12	1:38	162.61
2 台同時	表 13	1:19	132.26

表 9：配置パターン 3 の 4 台同時開始の
ステップごとの受電電力

	50cm 端末の 受電電力 (W)	1m 端末の 受電電力 (W)	ステッ プ時間 (h:m)
1 ステップ目	1.34	0.19	3:43
2 ステップ目	0	11.76	0:22

表 10：配置パターン 3 の 1 台ずつ給電の
ステップごとの受電電力

	50cm 端末の 受電電力 (W)	1m 端末の 受電電力 (W)	ステッ プ時間 (h:m)
1 ステップ目	7.03	0	0:43
2 ステップ目	0	20.00	0:15

表 11：配置パターン 3 の 1 台ずつ+2 台同時開始の
ステップごとの受電電力

	50cm 端末の 受電電力 (W)	1m 端末の 受電電力 (W)	ステッ プ時間 (h:m)
1 ステップ目	7.03	0	0:43
2 ステップ目	0	11.76	0:25

表 12：配置パターン 4 の 1 台ずつの受電電力

	50cm 端末の 受電電力 (W)	1m 端末の 受電電力 (W)	ステッ プ時間 (h:m)
1 ステップ目	12.75	0	0:23
2 ステップ目	0	4.05	1:14

表 13：配置パターン 4 の 2 台同時開始の受電電力

	50cm 端末の 受電電力 (W)	1m 端末の 受電電力 (W)	ステッ プ時間 (h:m)
1 ステップ目	11.96	3.19	0:25
2 ステップ目	0	4.05	0:54

4. 提案手法

3 章の予備実験で確認された給電特性に基づき、複数端末への給電時間の少ない効率的な給電手法を提案する。

4.1. 端末グループ化

3.3 節より送電機との距離が短すぎて、同時に給電するとすべての端末の受電に影響を及ぼす端末を別のタイミングで給電するように、端末のグループ化を行う (図 4)。グループ化の手順を図 5 に示し、以下に説明する。

- ① グループの番号 i を 1 に設定し、すべての端末を暫定的にグループ g_1 に含める。
- ② g_i に対して式 (2), (3) を用いて、一斉給電した時の送受電電力を求める。
- ③ g_i に端末が 1 台のみ、または、受電電力の合計が受電電力限界を超える、または、送電電力が送電電力限界値 (それ以上にはならない) の場合、 g_i をグループとして確定する。
- ④ ③ で g_i をグループとして確定できない場合、 g_i から、最大相互インダクタンスを持つ端末を一旦除外して②からの処理を繰り返す。
- ⑤ 除外されている端末があるかを判定する。ある場合は⑥へ、ない場合は⑦へ。
- ⑥ 除外された端末を用いて初期化を行い、暫定的に番号 $i = i + 1$ のグループとし、②からの処理を繰り返す。
- ⑦ グループ化を終了

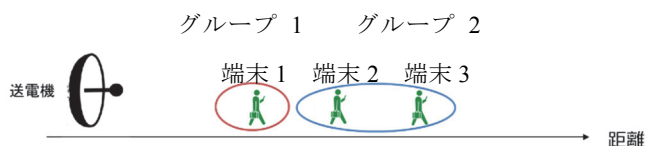


図 4：端末グループ化のイメージ

4.2. 給電スケジューリング

グループ毎に給電を行う。またグループ内では 3.1 節 (1) の問題が発生するが、受電電力量目標値に達した端末をスイッチ・オフさせて順次給電の対象から外し、電力が他端末に行き渡るように、各々の端末への給電時間の割当て (スケジューリング) を行う。

図 4 における 3 台の端末のグループ分けに従って給電する際の給電スケジューリングを図 6 に示す。横軸は端末への給電割当て時間の配分、縦軸は送電機と端末との距離であり、各端末の面積が受電電力量を示す。スケジューリングでは、この面積、即ち端末ごとの受電電力量が同じ受電電力量目標値になるように給電時間を割り当てる。

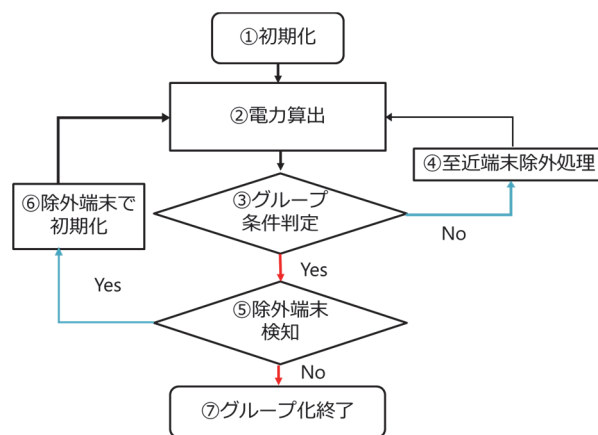


図 5：グループ化アルゴリズム

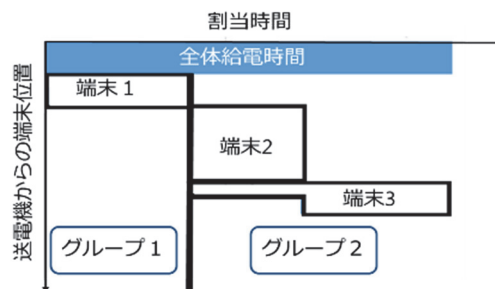


図 6 給電スケジューリング

5. シミュレーション評価

5.1. シミュレーション概要

提案手法の有効性を検証するためにシミュレーションによる評価を行った。

比較対象は、すべての端末を一つのグループにして一斉に給電を始めて、給電を終了した端末を順次除外する (以下、一斉給電と呼ぶ) 手法と、全ての端末を 1 台ずつ個別に給電 (以下、個別給電と呼ぶ) する手法とする。表 4 に示すパラメータですべての端末にそれぞれ 5Wh の電力量を端末 1 台毎に受電させると仮定して、提案手法と比較手

法の給電時間と送電電力量の比を算出しその累積分布の中央値を比較する。

5.2. 結果

一斉給電と比較した場合の提案手法の給電時間と送電電力量の比の累積分布をそれぞれ図 7 及び図 8 に示す。提案手法では、送電電力量の中央値が 0.07% の微上昇と引き換えに 12% の給電時間短縮となっている。

表 14：シミュレーション条件

端末台数	5 台
受電端末配置距離	0～5m の間で一様に設置 内 1 台は 0-1m に配置
試行回数	5,000 回
バッテリー初期残量	0%
給電量目標	100%(5Wh)
シミュレーション環境	MATLAB 2017a

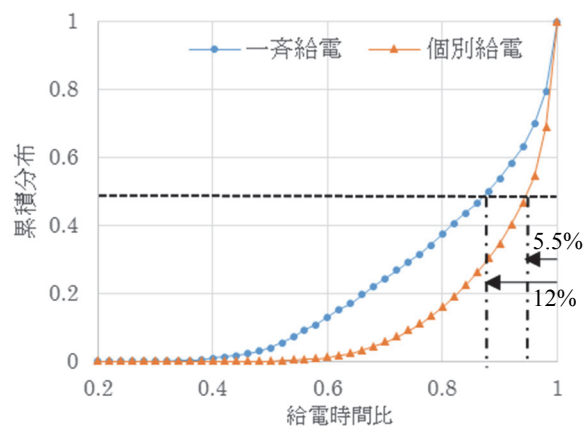


図 7：給電時間比の累積分布

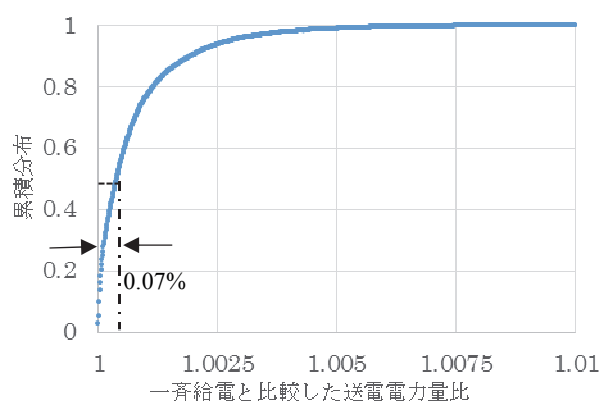


図 8：一斉給電と比較した送電電力量比の累積分布

一方で個別給電の場合の結果を図 7 及び図 9 に示す。提案手法では、給電時間が 5.5% 短縮され、また送電電力量も 12% 少なくなっている。

5.3. 考察

(1) 給電時間の短縮について

個別給電との比較では、提案手法では給電時間、送電電力量ともに削減できた。また、一斉給電との比較では、僅かな送電電力量の増加はあるものの、給電時間の短縮が図れた。一斉給電と比較した送電電力量の増加量に対する時間の短縮率を比で表すと、図 7 及び図 8 から、およそ 7 : 1200 となり、時間短縮に対する送電電力の消費の増加としては十分な効果があったと言える。

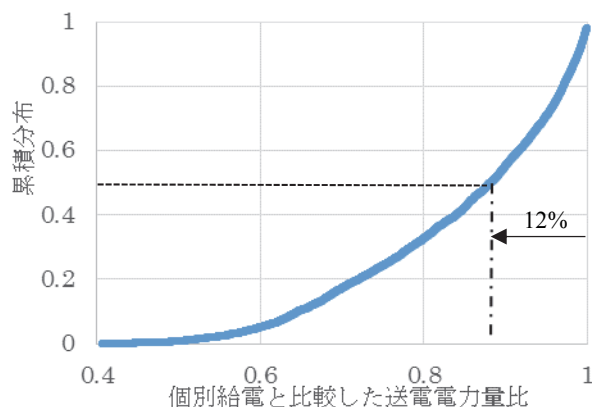


図 9：個別給電と比較した送電電力量比の累積分布

(2) 端末配置や電源電圧について

今回の表 14 のシミュレーション条件では、給電時間は一斉給電の場合に大きく短縮されたが、端末を 5 台使い全部ランダムに 0～5m に配置し、必ず 1 台は 0～1m にいるとは限らない状態とした場合のデータも追加取得して評価した。その結果を図 10 に示す。ここでは一斉給電の時間削減率が 3% になるのに対して個別給電の削減率が 18% と逆転する結果になった。その理由として、今回の送電機の初期固定電圧で 1m 以上の端末のみの配置とした場合、グループが 1 つで一斉給電を行うパターンが最も速く給電できると考えられる。そのため、提案のグループ化のアルゴリズムにおいては一斉給電より給電時間が長くない。実際に一斉給電と比較して、時間の短縮または送電電力量の増加が発生した実行回数に対する割合を表 15 に示す。表より一様に配置することで改善の発生率が下がることが確認できる。これは一斉給電が適したパターンが増えたためと考えられる。

実環境の電源のひとつとして今回 80V という比較的高めの電圧を設定したが、低めの電圧を設定した場合、送電電力量も低くなるため、受電限界電力まで引き出すための適切な距離が変化し、それにより端末のグループ化が必要となると考えられる。電圧を 80V から $20\sqrt{2}$ V に下げた場合の結果を図 11 に示す。グループに分けることによる時間短縮が確認できる。

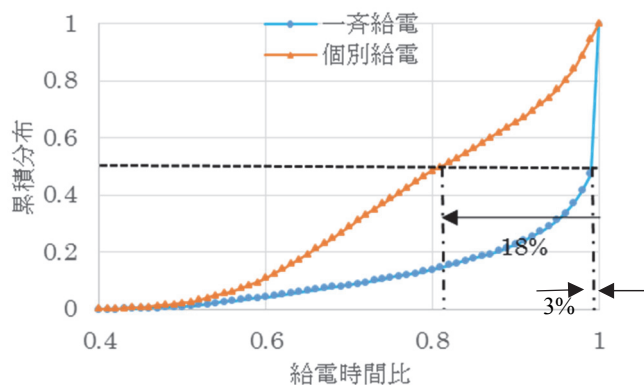


図 10：配置条件を変えた時の時間短縮率の累積分布

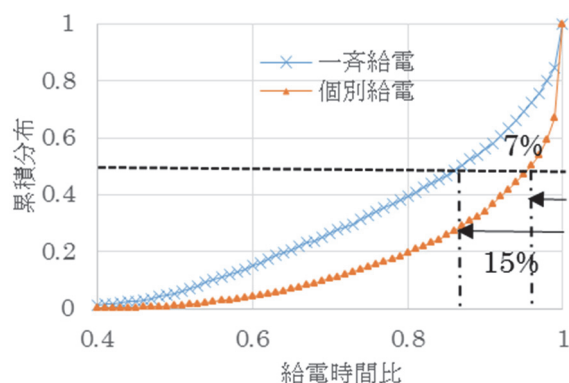


図 11：初期電圧を変えた場合の時間の短縮率の累積分布

表 15：時間短縮または送電電力量増加の発生率

	表 14 の配置	一様な配置
時間短縮率	97%	58%
送電電力量増加率	97%	58%

(3) 時間制限のある時の給電について

全ての端末に対し目標となる電力量を受電させることを目指したが、制限時間が与えられた時に多くの電力を受電させる時にも応用できる。この場合、最短の給電時間を求め、もし制限時間内に給電できないときは、時間内にすべての端末に公平にどのくらいの電力を供給できるかを予測し、その予測を目標電力量に設定すればよい。

(4) 給電時間と送受電効率の両立について

提案方式ではグループ分けを行うことで、給電時間の短縮を図った。表 6、表 9 および表 10 から、個別に給電させて受電電力を大きくしても比較的受電電力が弱めである。1 対 1 かつ送受電電力に限界のない場合は、図 2 のように受電電力がピークを迎える距離がある。今回は送電機が固定位置にあるが、今後送電機を移動させ、それに伴って再度グループ化やスケジューリングを行なわせることにより、より短時間で効率のよい給電が実現できると考えられる。具体的な方法については今後の検討課題である。

6. おわりに

磁気共振を用いた非接触給電において複数端末への給電時間の短い効率的な給電を可能とするため、予備実験の結果を基に受電端末のグループ化のアルゴリズム、グループ間およびグループ内の端末の給電スケジューリングの方法を提案した。シミュレーション評価により、受電端末 1 台ずつに給電を行う個別給電と比較して、給電時間を 5.5% 短縮し、しかも送電電力量を 12% 削減できること、また一斉給電と比較して、0.07% の僅かな送電電力量の増加はあるものの給電時間を 12% 短縮できることを確認した。

今後、送電機の移動を考慮した最適な給電方法の検討や実機による検証を行う。

参考文献

- [1] 特許庁, 平成 26 年度 特許出願技術動向調査報告書 (概要) 非接触給電関連技術, 2015
- [2] Liguang Xie, Yi Shi, and Y. Thomas Hou, "Wireless power transfer and applications to sensor networks," IEEE Wireless Communications, vol.20, no.4, pp.140-145, 2013.
- [3] André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science Express, Vol.317, No.317, pp.83-86, 2007
- [4] Mohammad R. Vedady Moghadam and Rui Zhang, "Multiuser wireless power transfer via magnetic resonant coupling: Performance analysis, charging control, and power region characterization," CoRR abs/1504.08090, 2015.
- [5] Takehiro Imura and Youici Hori, "Unified theory of electromagnetic induction and magnetic resonant coupling," IEEE Tans. IA, Vol.135, No.6, pp.697-710, 2015
- [6] 居村 岳広, 「磁界共振結合を用いたワイヤレス電力送電と諸技術」, 信学技報, vol. 116, no. 238, WPT2016-28, pp. 49-54, 2016
- [7] 居村 岳広, 阿部 浩之, 内田 利之, 堀 洋一, 「共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力送電」, 電学論 D, Vol130, No.1, pp76-83, 2010
- [8] M. Kesler, "Highly resonant wireless power transfer: Safe, efficient, and over distance," WiTricity Corporation, 2013.
- [9] 畑 勝裕, 居村 岳広, 堀 洋一, 「磁界共振結合方式のワイヤレス電力送電における受電側の情報を用いた 2 変数同時推定法」, 電気学会論文誌 D, Vol137, No.2, pp.104-111, 2016
- [10] 総務省, 「電波法施行規則の一部を改正する省令 (平成 28 年総務省令第 15 号)」, 2016