

[特別講演] ワイヤレス電力伝送システムにおける パワーエレクトロニクス技術

伊東 淳一[†] 日下 佳祐[†]

[†]長岡技術科学大学大学院工学研究科 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

E-mail: [†] {itoh, kusaka}@vos.nagaokaut.ac.jp

あらまし 2007年以降、ワイヤレス電力伝送システムに関する研究・開発が活発化している。ワイヤレス電力伝送システムでは、システム内の1次側電力変換器と2次側電力変換器の回路構成並びに、これらの変換器の駆動方法がワイヤレス電力伝送システムの特性を決定づける。しかしながら、現在のところ電力変換器を考慮してワイヤレス電力伝送システムを設計することの重要性が理解されているとはいいがたい。特に、ワイヤレス電力伝送システムの大容量化を目指すためには、電力変換器の構成や駆動方法を工夫し、損失、放射ノイズ、位置ずれ等の問題を解決する必要がある。本稿では、著者らがこれまでにに行った電力変換器を用いたワイヤレス電力伝送システムの特性改善手法を一部紹介する。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 非接触給電, パワーエレクトロニクス

[Special Talk] Power Electronics for Wireless Power Transfer

Jun-ichi ITOH[†] Keisuke KUSAKA[†]

[†] Dept. of Engineering, Nagaoka University of Technology 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188 Japan

E-mail: [†] {itoh, kusaka}@vos.nagaokaut.ac.jp

Abstract Since 2007, wireless power transfer systems have been actively studied. The circuit configuration of the power converters and its control dictates the characteristics of the wireless power transfer systems. In present, however, the importance of the design considering both the coils and the power converters has not been recognized. Power loss, radiative noise and misalignment will be a problem to increase the transmission power of the wireless power transfer system. This paper introduces methods for improving performance of the wireless power transfer system using the power converters.

Keywords Wireless Power Transfer, Inductive Power Transfer, Power Electronics

1. はじめに

近年、ワイヤレス電力伝送システムの研究開発が活発化している[1-4]。一口にワイヤレス電力伝送システムと言っても電磁誘導現象を用いた方式や、マイクロ波やレーザ、電界を用いたワイヤレス給電など、種々のワイヤレス電力伝送方式が報告されている[1]。この中で、既に実用化された実績があり、また、将来的に電気自動車や鉄道車両へのワイヤレス電力伝送など幅広いアプリケーションへの適用が期待されているのが電磁誘導現象を用いたワイヤレス電力伝送システムである。電磁誘導現象を用いたワイヤレス電力伝送システムに限定しても、2007年から現在に至るまでの間に著しい数の論文が国内外で発表されている[5]。

ワイヤレス電力伝送システムは、一般的に数十 kHz から数十 MHz までの高周波数で電力伝送を行うため、伝送コイルの1次側と2次側にはパワーエレクトロニクス回路（電力変換器）が必要となる。ワイヤレス電力伝送の理論検討を行う場合には理想電源や交流負荷

が用いられることが多いものの、実際にはこれらの電力変換器の回路トポロジーや制御方法によってワイヤレス電力伝送システムの特性は大きく変化する。また、これらの電力変換器で生じる損失はシステム全体で生じる損失に対して無視できない。したがって、ワイヤレス電力伝送システムにおいて電力変換器の回路トポロジー及び制御方法がシステム全体の特性を決定づける。本論文では、ワイヤレス電力伝送システムの大容量化に伴って生じる損失の増加、放射ノイズ、位置ずれ対策等の問題に対して、電力変換器を用いてこれらを改善する手法を紹介する。

2. ワイヤレス電力伝送システムの開発動向

2.1. 伝送周波数の推移

図1に電磁誘導現象を用いたワイヤレス電力伝送システムにおける伝送周波数の年次推移を示す[5-6]。ただし、ここで図1(a)は全体、(b)は(a)のうち低周波領域を拡大した図である。本調査は電気学会、IEEEが出版した論文誌及び、学会論文集の一部を対象として行っ

た。なお、調査対象は1970年から2015年9月までに出版された論文である。また、理論の提唱や、システム設計、シミュレーション結果のみが記されている論文は除外しており、電力伝送が実験もしくは実証されていることが論文により明確に確認可能である場合のみを示している。詳細は文献[5-6]を参照されたい。

1978年に米国のJ. G. Bolgerらが自動車向けワイヤレス電力伝送システムを報告している。当時は、1976年に小信号用MOSFETが開発されたばかりであり、高周波の交流を連続的かつ高効率に得る方法が確立されていなかった。そのため、J. G. Bolgerらは誘導機に機械的にカップリングした発電機の出力をワイヤレス電力伝送システムの電源として使用していた。そのため、伝送周波数として150Hzから210Hzという低周波を選ばざるを得なかった。

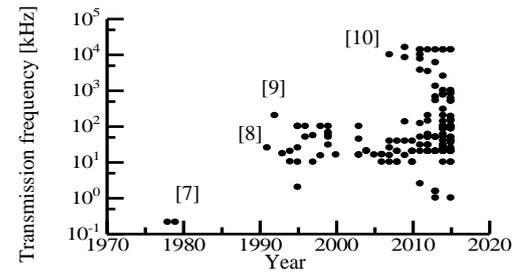
MOSFETの開発を皮切りに、1970年後半から徐々にワイヤレス電力伝送の電源として使用可能な半導体スイッチングデバイスが開発され始める。例えば1976年に開発されたMOSFETは徐々に高耐圧化、大容量可が進められ、1984年にはNon-latch-up IGBTが発明された。また、この頃にはパワートランジスタの高耐圧化・大容量化も進められたこともあり、1990年からこれらの半導体スイッチングデバイスを用いたワイヤレス電力伝送システムが報告され始める[8-9]。2000年頃までの約10年間はこのような10kHzから100kHz程度の周波数を用いたワイヤレス電力伝送が主流であった。

ところが、2007年にMassachusetts Institute of Technology (MIT)のA. Kursらが9.9MHzもの高周波でワイヤレス電力伝送のデモンストレーションを行ったことを境に、状況が一変する[10]。A. Kursらは当初結合モード理論を用いて現象を説明しており、電磁誘導現象を用いたワイヤレス電力伝送方式とは異なる技術であると認識されたため、多くの研究者がISM帯である6.78MHzと13.56MHzを用いた研究に取り組み始めた。しかしながら、その後の研究によりMITが報告した技術は電磁誘導方式の一種であることが示されている[11]。そのため現在ではワイヤレス電力伝送システムの小型軽量化を狙うアプリケーションにておいて限定的に高周波伝送が行われている。

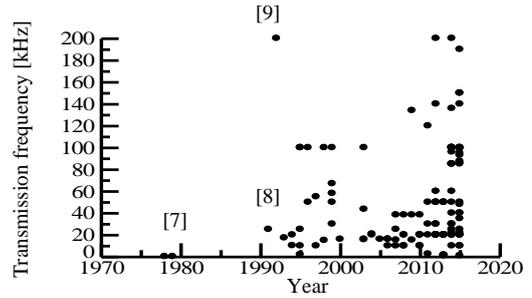
これまで述べたように、数MHz以上の周波数がワイヤレス電力伝送で使用されることは稀であり、数十kHzから数百kHzでの電力伝送が一般的である。

2.2. 電力変換器の構成

図2にこれまで電気学会及びIEEEの論文誌及び一部の国際会議において報告されたワイヤレス電力伝送システムの開発動向を示す[5-6]。図2(a)はワイヤレス電力伝送システムの1次側電力変換器に着目した分類、図1(b)は2次側電力変換器に着目してプロット記号を



(a) 全周波数領域



(b) 低周波領域

図1 ワイヤレス電力伝送システムにおける伝送周波数の年次推移（電磁誘導方式）

分類している。

ワイヤレス電力伝送システムは数十Wから数十kWまでの広い範囲で開発が進められている。車両向けワイヤレス電力伝送システムに着目すると、これまでは乗用自動車向けとして3kWから7.7kWまでのワイヤレス電力伝送システムが多く報告されていたが、近年は大容量化の要求が強く、バスやトラックなどの大型自動車に向けて52kWのシステムが開発されるなど、年々大容量化が進んでいる。これに伴って数kHzから数十kHzの周波数帯が用いられはじめている。図2に示したとおり、これらの周波数帯では線形増幅器ではなくスイッチングを用いた電力変換器が主に用いられる。特に1次側電力変換器としてはフルブリッジインバータ、2次側電力変換器としてはフルブリッジ整流器が多く用いられる。

3. 大容量ワイヤレス電力伝送システムにおける課題

図3に一般的なワイヤレス電力伝送システムの回路構成を示す。第2章で述べたように、ワイヤレス電力伝送システムにおいて電力変換器の役割がますます重要化している。本章では、ワイヤレス電力伝送システムの大容量化に伴う課題と、その解決が可能な電力変換器の回路構成・制御方法について議論する。

3.1. 損失

大電力のワイヤレス電力伝送システムでは、伝送効率のみならず、伝送コイルの前段及び後段に接続された電力変換器の効率を高めることも重要となる。例え

ば、3.3kW のワイヤレス電力伝送システムにおいてシステムの効率が 90%だとすると、330W が熱エネルギーに変換されることとなる。これは、伝送効率が低いという直接的な問題だけではなく、システムを冷却するための冷却装置の大型化をまねく。

これまでワイヤレス電力伝送システムの効率を評価する指標として結合係数 k と共振の鋭さ Q の積からなる kQ 積が広く用いられてきた。例えば、文献[12]では1次側直列/2次側直列共振方式(S/S)方式ならびに、1次側直列/2次側並列共振方式(S/P)において伝送効率が(1)式で示されることを示している。ただし、ここで η_{max} は最大伝送効率であり、伝送コイルの巻線で生じる損失のみを考慮したものである。また、1次側コイルと2次側コイルの自己インダクタンス及び等価直列抵抗 r は等しいものとする。

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{2}{kQ}} \dots\dots\dots(1)$$

しかしながら、 kQ 積を用いてシステムの効率を議論するには下記の問題がある。

1. 同出力電力での評価でない

伝送効率が(1)式で計算される場合、すなわち伝送効率が最大となるときの出力電力 P_{out_max} を(2)式に示す。ただし、ここで V_1 は1次側電源電圧である。なお、 kQ 積が十分大きい時、(2)式の近似が成立する。

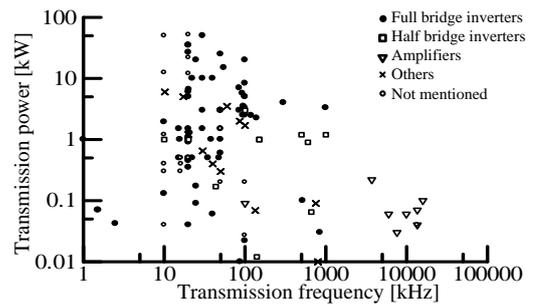
$$P_{out_max} = \frac{k^3 Q^3}{\{k^2 Q^2 + kQ + 1\}^2} \frac{|V_1|^2}{r} \approx \frac{|V_1|^2}{k\omega L} \dots\dots\dots(2)$$

高い kQ 積をもつ伝送コイルを用いたワイヤレス電力伝送システムは高効率であるとされてきた。この説明は一部正しいものの、前提条件が説明されていないことが多い。 kQ 積が大きい場合には、最大伝送効率は高くなる。しかしながら、出力電力が等しいことが担保されていない。(2)式から明らかのように、 kQ 積が変化するとシステムの出力電力も同様に变化する。異なる出力電力をもつシステムの最大効率を比較・議論しても無意味であることは明白である。ワイヤレス電力伝送システムの最大の目的は、ある入力電圧から、所望の電力を供給することにある。たとえ ωL を大きくすることで効率が最大となるからといって所望の電力を伝送できないのでは意味が無い。

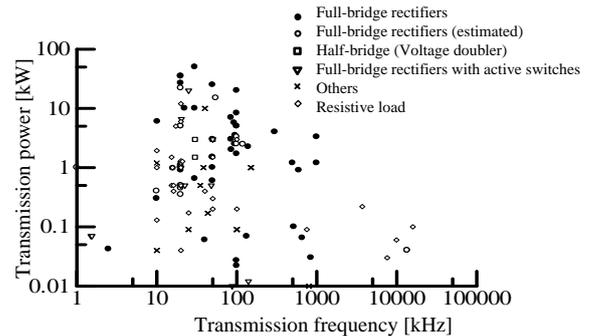
なお、(2)式よりシステムを大容量化するためには伝送コイルインピーダンス ωL を低下させる必要がある。しかしながら、電流値が増加することにより近接効果および表皮効果の影響が増大するため、等価直列抵抗 r が増加し、高 Q 値を維持するのは困難である。

2. 鉄損が未考慮

数十 kHz の伝送においては結合係数を高めるため伝



(a) 1次側電力変換器による分類



(b) 2次側電力変換器による分類

図2 ワイヤレス電力伝送システムにおける伝送周波数と伝送電力の関係

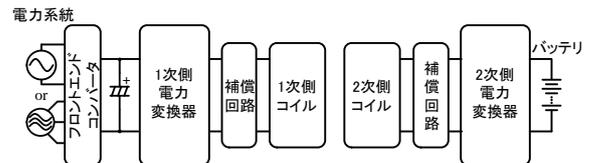


図3 一般的なワイヤレス電力伝送システムの構成

送コイルに磁性体を用いるのが一般的である。 kQ 積を用いて伝送効率を表した(1)式では巻線の銅損(巻線インダクタンスに直列に挿入される抵抗で生じる損失)のみを考慮している。一方、鉄損はトランスの T 型等価回路において、励磁インダクタンスに直列に挿入される鉄損抵抗で表される。したがって、鉄損が無視できない場合には kQ 積から導出した効率式は実験結果と一致しない。文献[13]では磁気抵抗の試験的な同定方法を示しており、この鉄損抵抗を考慮した伝送効率と試験結果が良好に一致していることを示している。

3. 変換器の損失を考慮していない

Q 値を上げるため伝送周波数を高周波化する例が見られる。伝送効率のみの議論で言えば、巻線抵抗の増加割合よりも ωL の増加割合が大きいのであれば、最高効率は改善される。しかしながら、伝送周波数を闇雲に高くすることは電力変換器で生じる損失を増加させることを意味する。

一般的には電力変換器で生じるスイッチング損失はスイッチング周波数(多くの場合スイッチング周波

数は伝送周波数に等しい) に比例して増加する。変換器の損失はシステム全体の損失に対して無視できず、 kQ 積での効率の議論は十分でない。

上記の理由から、 kQ 積を用いたワイヤレス電力伝送システムの効率評価は十分ではなく、電力変換器を含めてシステム全体の損失を考慮しながら設計を行う必要がある。

3.2. 寄生パラメータの影響

大容量化に伴い、寄生パラメータの影響が相対的に大きくなる。これらの受動要素の影響はシステムのパーセントインピーダンス(%Z)を用いて表すとシステムの容量が異なる場合でも、同じ基準で寄生パラメータ等の影響を評価できる。%Zは定格電圧 V_n と定格電流 I_n からなる定格インピーダンス $Z_n (= V_n / I_n)$ に対する、回路要素のインピーダンス (例えば配線インダクタンスのインピーダンス $Z = \omega L$) の比 $\%Z = Z / Z_n$ である。例えば電流定格 I_n を 10 倍にすると、定格インピーダンスが元のシステムの 1/10 となるため、配線インダクタンスの %Z が 10 倍となる。すなわち、その配線インダクタンスで生じる電圧降下が 10 倍となる。システムの大電流化を行った場合、このように定格インピーダンスが小さくなるため、寄生パラメータの影響を受けやすい。また、大電流化に対応するために巻線径を大きくしたとしても、実際には巻線抵抗 r の低減には制限があることが多く、大容量のシステムではこれらの巻線による電圧降下が無視できない。

3.3. 位置ずれ対策

一般に、ワイヤレス電力伝送システムについて効率の議論をする場合、共振パラメータが設計値に一致していることを前提とする。例えば、S/S 方式では共振周波数において自己インダクタンスと共振コンデンサが共振するようパラメータが決定される。しかしながら、伝送コイルの位置ずれが発生した場合、1 次側伝送コイルと 2 次側伝送コイルの位置関係が変化し、磁気抵抗が変化する。これにより巻線の自己インダクタンスが変化する。つまり、共振周波数と伝送周波数が異なる。

また、共振に用いるコンデンサも公称値から 10% から 20% 程度のばらつきを有しているのが一般的である。このように、共振周波数と伝送周波数に誤差が生じると、共振コンデンサで漏れリアクタンスを補償できなくなるため、巻線のインダクタンスにおいて大きな電圧降下が生じ、所望の出力電力を得ることができなくなる。特に共振の鋭さ Q 値が高いシステムにおいては、このばらつきの影響が無視できず、システムの効率を大きく低下させる。さらに、大容量のワイヤレス電力伝送システム特有の問題として、共振コンデンサの大型化がある。これはコンデンサの端子間電圧が共振に

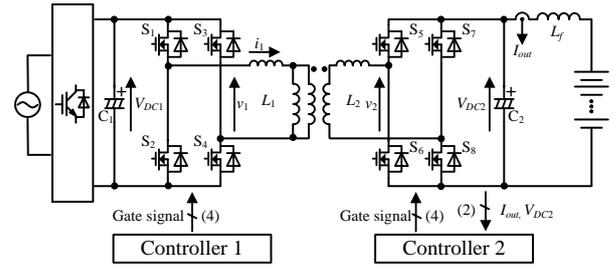
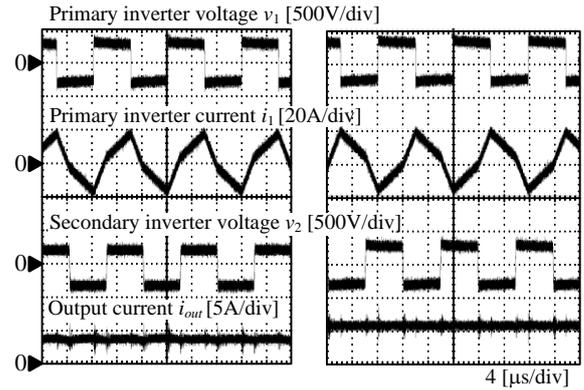


図 4 DAB コンバータ動作を応用したワイヤレス電力伝送システム



(a) Charging operation (b) Discharging operation
図 5 DAB コンバータ動作を応用したワイヤレス電力伝送システムの動作波形

より高圧となることに加え、全負荷電流がコンデンサを通過するため、高耐圧かつ電流リップル許容値の大きなコンデンサを選定しなければならないためである。

図 4 に上記の問題を解決するため著者らが提案している非共振形ワイヤレス電力伝送システム[14]を示す。本システムは共振を用いずに電力伝送を行うため、共振パラメータが変動した場合においても、高い伝送効率を維持することが可能である。共振を用いないワイヤレス電力伝送システムでは、無効電流の増加に伴い変換器のスイッチング損失と導通損失、巻線の銅損が増大する問題がある。そこで、本システムでは Dual active bridge (DAB)コンバータ[15-16]の動作を参考にして 1 次側電力変換器と 2 次側電力変換器間に位相シフト制御を導入することで、無効電流が大きい場合にもゼロ電圧スイッチングを実現することで変換器において生じるスイッチング損失を低減する。なお、銅損と導通損失については巻線の並列化やオン抵抗の低いスイッチングデバイスの並列化により低減する。

図 5 に DAB コンバータ動作を応用したワイヤレス電力伝送システムの動作波形を示す。図 5(a)がバッテリー充電時の動作、図 5(b)がバッテリー放電時の動作である。1 次側交流電圧に対して 2 次側交流電圧が位相遅れの場合、パワーフローはバッテリー充電方向となり、反対に 1 次側交流電圧に対して 2 次側交流電圧が位相進みの場合パワーフローが反転する。実験結果より、

双方向に電力フローを制御可能であることが分かる。巻線には方形波状の電流が流れるがこの電流により 1 次側インバータと 2 次側インバータはゼロ電圧でスイッチングする。なお、結合係数 0.4 の時の最高効率 (DC-to-DC 効率)は 92.6%である。

3.4. 放射ノイズ

ワイヤレス電力伝送システムでは伝送コイルに通流する電流によって周辺に放射磁界が生じる。ループコイルに通流する電流に比例することが知られており、大電力化に伴って放射されるノイズは増加する。製品化を考慮した場合、これらの製品は高周波利用設備として扱われるため、製品化にあたって規制値を満足しなければならない。

図 6 に現在議論されている国内の自動車向けワイヤレス電力伝送システムの放射磁界強度の規制値を示す。85kHz 帯を用いた自動車向けワイヤレス電力伝送システムでは CISPR が定めた規制値に対して、一部の周波数帯において規制値が緩和される見込みである [17]。

これまで、放射ノイズの抑制手法が種々提案されている [18-22]。文献 [18]では、伝送コイルの周囲に磁性体や金属を設置することで、放射磁界の抑制を目指している。文献 [19]では 3 相のワイヤレス電力伝送システムを適用することで互いに放射ノイズを打ち消し、抑制する手法を提案している。また、2 組の伝送コイルの位置を調整し、かつ逆相で電力を伝送することで放射ノイズを抑制する手法も提案されている [20]。しかしながら、これらの手法では追加の磁性体や金属、また追加の伝送コイルが必要となるため、システムの小形化や低コスト化の妨げとなる。

図 7 に著者らが提案しているスペクトラム拡散を用いたワイヤレス電力伝送システムのシステム構成と制御ブロック図を示す [21-22]。提案手法は、伝送周波数を 79kHz から 90kHz の周波数範囲内で毎周期ランダムに変化させることで、伝送コイルに通流する電流のスペクトラムを周波数領域上で分散させ、放射ノイズのピーク値を抑制する。なお、伝送周波数は M 系列を用いた擬似乱数に基づいて選択される。

図 8 にスペクトラム拡散を適用した場合の動作波形、図 9 に 1 次側コイルを通流する電流の高調波解析結果を示す。それぞれ (a) は従来法であり一定周波数で駆動した場合、(b)(c) が伝送周波数をランダムに変化させた場合の結果である。なお、(b) は均一な確率分布から伝送周波数を選択した場合、(c) が伝送コイルのインピーダンスを考慮して確率分布にバイアスを与えた場合の結果である。

実験結果より、スペクトラム拡散を適用することで伝送コイルを通流する電流の最大値を低減可能であることを確認した。

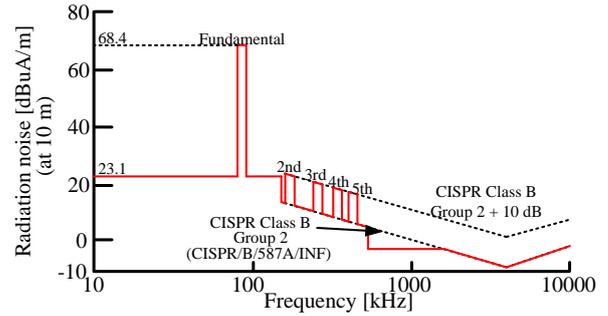


図 6 自動車向けワイヤレス電力伝送システムの放射磁界強度規制値

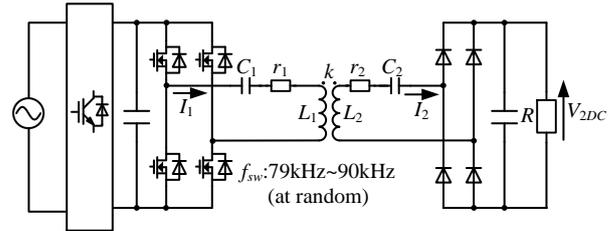


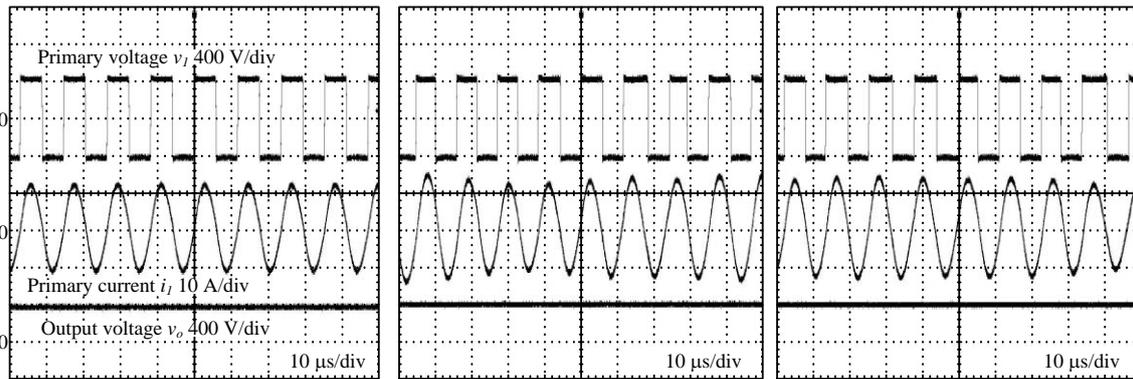
図 7 スペクトラム拡散を用いたワイヤレス電力伝送システムの放射ノイズ抑制法

4. まとめ

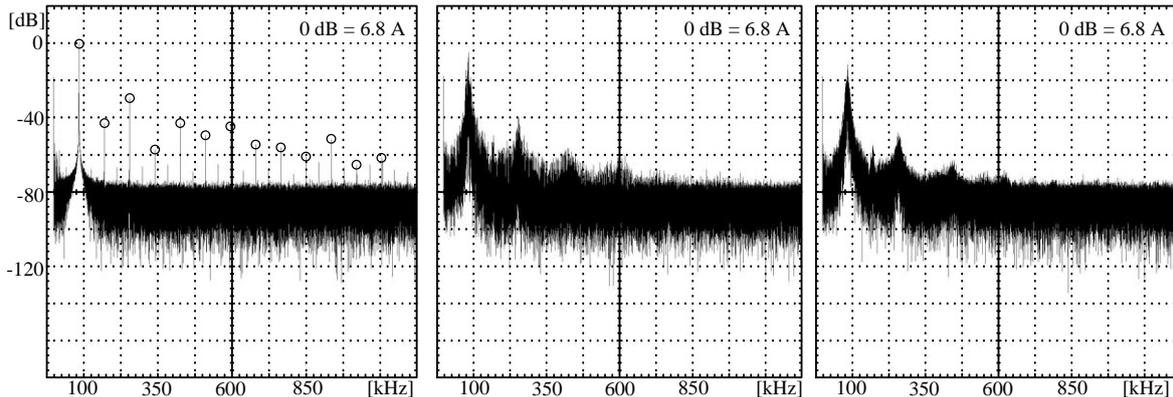
本稿では、ワイヤレス電力伝送システムに使用される電力変換器の回路構成及び駆動方法に着目し、これらの回路構成や駆動方法を工夫することでワイヤレス電力伝送システムの特性を改善する手法を紹介した。ワイヤレス電力伝送システムの高性能化のためには、伝送コイルの特性のみを考慮するのではなく、電力変換器の回路構成と駆動方式を考慮してシステム全体を一括して設計する必要がある。

文 献

- [1] 特許庁「平成 26 年度特許出願技術動向調査報告書 非接触給電関連技術」(2015)
- [2] J. Dai, D. C. Ludois: "A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6017-6029 (2015)
- [3] M. P. Kazmierkowski, A. J. Moradewicz: "Contactless Energy Transfer (CET) Systems - A Review", 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 4-6 (2012)
- [4] G. A. Covic, J. T. Boys: "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 1, No. 1, pp. 28-41 (2013)
- [5] 日下佳祐, 伊東淳一「電磁誘導現象を用いた非接触給電システムの開発動向」, 電気学会半導体電力変換研究会・モータドライブ研究会, SPC-16-121, MD-16-085 (2016)
- [6] 日下佳祐「リアクタンスキャンセル機能を有する電力変換器を用いた非接触給電システムの低損失化」, 長岡技術科学大学 博士論文 (2016)
- [7] C. E. Zell, J. G. Bolger, "Development of an engineering prototype of a roadway powered electric transit vehicle system: A public/private sector



(a) 一定周波数 (b) スペクトラム拡散 (確率分布: 均一) (c) スペクトラム拡散 (確率分布: バイアス)
 図 8 スペクトラム拡散適用時の動作波形



(a) 一定周波数 (b) スペクトラム拡散 (確率分布: 均一) (c) スペクトラム拡散 (確率分布: バイアス)
 図 9 スペクトラム拡散適用時の 1 次側電流高調波

- program”, 32nd IEEE Vehicular Technology Conference 1982, Vol. 32, pp. 435-438 (1982)
- [8] A. Esser, H. Skudelny: “A New Approach to Power Supplies for Robots”, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 27, No. 5, pp. 872-876 (1991)
- [9] H. Sakamoto, K. Harada: “A Novel Circuit For Non-contact Charging Through Electro-magnetic Coupling”, 23rd IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 168-174 (1992)
- [10] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic: “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, Science, Vol. 317, pp. 83-86 (2007)
- [11] 居村岳広, 堀洋一 「電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論」, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 6, pp. 697-710 (2015)
- [12] 遠井敬大, 金子裕良, 阿部茂 「非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現」, 電気学会論文誌 D, Vol. 132, No. 1, pp. 123-124 (2012)
- [13] 千明将人, 長塚裕一, 金子裕良, 阿部茂, 保田富夫, 鈴木明 「電気自動車用非接触給電トランスの新コア構造と鉄損のモデル化」, 電気学会論文誌 D, Vol. 132, No. 1, pp. 9-16 (2012)
- [14] 日下佳祐, 伊東淳一 「Dual Active Bridge Converter 動作を応用した非共振形非接触給電システムの基礎検証」, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 2, pp. 145-151 (2016)
- [15] R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan, M. H. Kheraluwala: “A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density dc/dc Converter for High-Power Applications”, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 27, No. 1, pp. 63-73 (1991)
- [16] 井上重徳, 赤木泰文 「双方向絶縁形 DC/DC コンバータの動作電圧と損失解析」, 電気学会論文誌 D, Vol. 127, No. 2, pp. 189-197 (2007)
- [17] 総務省 国際無線障害特別委員会 (CISPR) の諸規格に関する情報通信審議会からの一部答申 「諮問第 3 号 「国際無線障害特別委員会 (CISPR) の諸規格について」のうち「ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件」のうち「電気自動車用ワイヤレス電力伝送システムに関する技術的条件」 (2015)
- [18] 毎川研吾, 今井邦夫, 皆川裕介, 有満稔, 岩野浩 「電気自動車用非接触充電システムの周辺磁場低減技術」, 自動車技術会 学術講演会前刷集, No.110-13 (2013)
- [19] 成田大輝, 居村岳広, 藤本博志, 堀洋一 「磁界共振結合を用いた多相ワイヤレス電力伝送における漏洩電磁波抑制」, 電子情報通信学会技報, WPT2014-31 (2014)
- [20] 鈴木正俊, 小川健一郎, 杜塚英美, 司城徹, 石原寛明, 兼清靖弘, 小倉浩嗣, 石田正明, 尾林秀一 「EV バス向けワイヤレス急速充電システムにおける EMI 対策」, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 4-11 (2016)
- [21] K. Kusaka, K. Inoue, J. Itoh, “Reduction in Radiation Noise Level for Inductive Power Transfer System with Spectrum Spread”, EVTeC 2016 & APE Japan, No. 20169063, pp. (2016)
- [22] Kent Inoue, Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh, “Reduction on Radiation Noise Level for Inductive Power Transfer Systems with Spread Spectrum focusing on Combined Impedance of Coils and Capacitors”, IEEE ECCE 2016