

力と伝送周波数の関係を示す。また、各伝送電力・周波数帯域で広く用いられている電力変換器の構成を明らかにする。これまで発表された非接触給電システムにおいて、伝送電力と伝送周波数、回路トポロジーの関係を集合知としてまとめることで、新たに非接触給電システムを開発する際、要求仕様として伝送電力が与えられれば、適当な伝送周波数と回路トポロジーを決定する指針が得られる。これは、非接触給電システムの研究開発を促進することとなり、非接触給電分野の発展にとって有用なものであると考えられる。

2. 開発動向

本論文では電気学会及び IEEE が 1978 年から 2015 年 9 月までに出版した論文誌並びに、会議等で発表された文献の一部のうち、表 1 に示す用語が論文タイトルもしくは本文中に含まれる文献の一部を調査対象とした。なお、近年の研究により磁界共振結合方式(「磁気共鳴方式」「磁界共鳴方式」とも呼ばれる)は電磁誘導現象の一部であることが認知されてきているため⁽⁵⁾、本論文ではこれらを区別しない。

〈2・1〉 伝送周波数の推移 図 1 に電磁誘導現象を用いた非接触給電システムにおける伝送周波数の年次推移を示す⁽⁶⁻¹⁹⁷⁾。ただし、ここで(a)は全体、(b)は(a)のうち低周波領域を拡大した図である。図 1 において、横軸は文献の発表年を示している。非接触給電システムに適用される伝送周波数は電力変換技術の発展と密接な関係がある。1978 年、米国 J. G. Bolger らにより初めて電磁誘導現象を用いた非接触給電システムの実証試験結果が示された⁽¹⁹⁷⁾。この文献では、高周波出力を得るために電動機に機械的にカップリングした発電機を高周波電源 (150~210 Hz) として用いている。当時、半導体電力変換技術は発展途上にあり、非接触給電に必要な高周波出力を連続的かつ高効率に発生させる方法が確立されていなかったことが、このような構成をとらざるをえなかった理由として挙げられる。その後、パワーランジスタの発展や、MOSFET、IGBT などが実用段階を迎え、これらが非接触給電システムにおいても適用され始めた。例えば、A. Esser らは 1991 年に多軸ロボット向けの回転トランスとして 650 V 耐圧の IGBT を用いて 25 kHz で非接触給電を行っている⁽¹⁸⁸⁾。また、1992 年には MOSFET を用いた C 級増幅器による 200 kHz を伝送周波数として非接触給電が報告されている⁽¹⁸⁹⁾。

このように、はじめは数百 Hz という低周波で実現された非接触給電システムは、半導体スイッチの発展に伴い徐々に高周波化が進められてきた。特に近年では、数十 kHz~数百 kHz の低周波領域と MHz 以上の周波数帯域を用いる高周波領域に二分化する傾向にある。低周波領域では、これまでも半導体電力変換回路が広く適用されている周波数帯であることから、すでに電力変換技術が確立されていることが利点となる。また、自動車向け非接触給電システムの標準化が 85 kHz 近傍で進められていることの影響もある⁽¹⁹⁸⁾。

Table 1. Terms for survey.

Terms (in Japanese)	Terms (in English)
非接触給電	Wireless power transfer
非接触充電	Wireless power transmission
非接触電力伝送	Wireless power delivery
無線給電	Wireless power supply
ワイヤレス給電	Wireless charging
ワイヤレス電力伝送	Wireless energy transmission
ワイヤレス充電	Inductive power transfer
無線電力伝送	Inductive power transmission
	Inductive charging
	Inductive charger
	Resonant inductive coupling
	Resonant magnetic coupling
	Contactless power transfer
	Contactless power transmission
	Contactless power supply

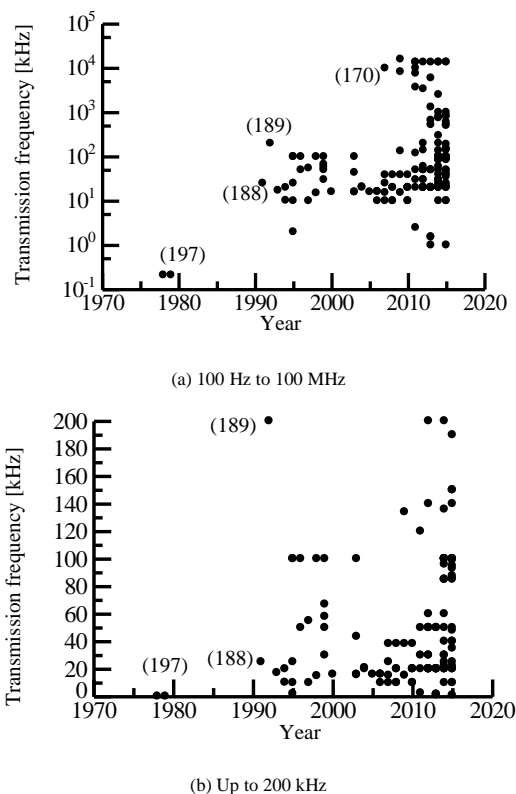


Fig. 1. Trend for transmission frequency of inductive power transfer.

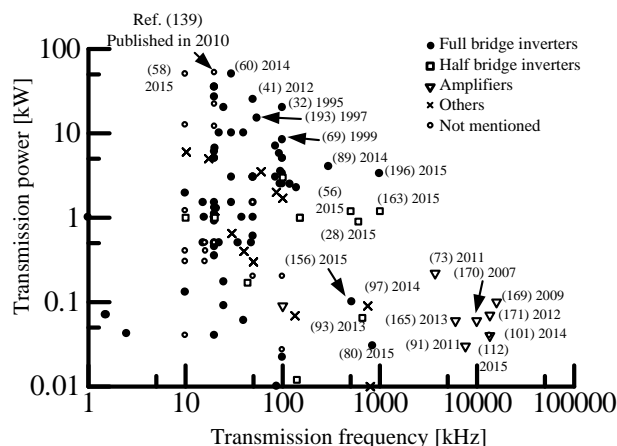
一方、MHz 以上の周波数帯域は 2007 年の Massachusetts Institute of Technology の A. Kurs らが 10 MHz 近傍で非接触給電システムを報告したことが大きく影響している⁽¹⁷⁰⁾。文献(170)では、非接触給電の原理を結合モード理論により説明していたため、当初「Magnetic resonance」「磁気共鳴方式」「磁界共振結合方式」などと呼ばれ、従来の電磁誘導現象とは異なる現象を用いていると認識された。そのため多くの

技術者, 研究者が MHz 帯を用いた非接触給電システムの開発に取り組むようになった。そのため MIT の発表を境に MHz 帯を用いた非接触給電システムの報告が急増する。しかしながら, 現在は MIT による報告は電磁誘導現象を用いた非接触給電の一種であると認識され始めたため⁽⁵⁾, 現在では主に伝送システムの小型化を狙った研究において MHz 帯が用いられている。

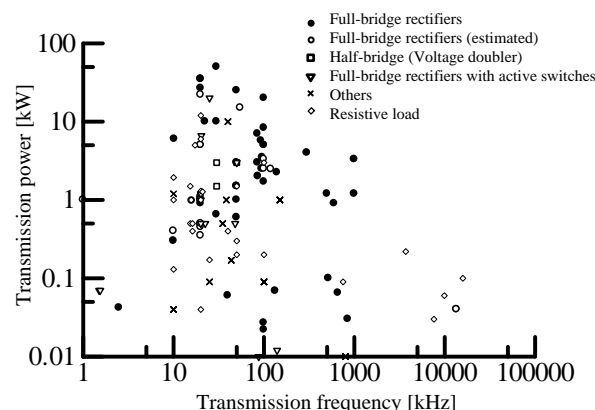
〈2・2〉 伝送周波数と伝送電力の関係 図 2 にこれまで報告されている非接触給電システムの伝送周波数と伝送電力の関係を示す。図 2(a)は 1 次側電力変換器の構成, 図 2(b)は 2 次側電力変換器の構成毎にプロットにより分類した。非接触給電システムは小容量では 1 W 未満から 52 kW の大容量まで幅広い電力範囲で研究開発が行われている。大容量の非接触給電システムの 1 つとして, バス等の大型電気自動車をアプリケーションとした 52 kW, 20 kHz の非接触給電システムがある⁽¹³⁹⁾。また, 鉄道車両向け非接触給電システムの研究も行われている。鉄道車両向けとしては数百 kW 以上の伝送が求められており⁽²³⁾, 大容量化に向けた検討は続けられているものの, 現在のところスケールモデルを用いた検証段階である。反対に, 10 W 未満の非接触給電も多く見られる⁽¹⁰⁾⁽¹⁰⁶⁾⁽¹¹⁰⁾。このような小電力を伝送した報告が見られる理由として, WPC により策定されている Qi 規格の最大供給電力が 5 W であったことが挙げられる。ただし, 2015 年現在, 最大供給電力 15 W にて新しい規格が策定されつつあるため, Qi 規格対応システムは今後伝送電力が徐々に増加していくことが見込まれる。一方, 数 MHz から数十 MHz を超える非接触給電システムでは伝送電力が数 mW から数百 mW 程度であることが多い。これらは高周波化に向けた取り組みの中で, ベクトルネットワークアナライザ(VNA)を用いた理論的な検証が含まれているためである。

伝送周波数に着目すると, 20 kHz 近傍を用いた非接触給電が多く報告されている。20 kHz 近傍はパワーエレクトロニクス回路でキャリア周波数として従来から広く用いられている周波数であるため, 電力変換器の導入が容易であるという背景がある。また, 20 kHz が人間の可聴域外であるという利点もある。次に多く見られるのが 100 kHz 近傍である。これは, 近年自動車向け非接触給電システムの標準化が 85 kHz 帯(79 kHz~90 kHz)で進められていることが影響している⁽¹⁹⁸⁾。

次に, 伝送電力と伝送周波数の関係に着目する。図 2 に示した通り, 伝送周波数と伝送電力には密接な関係がある。非接触給電システムの大容量化を実現するためには伝送周波数を低くする必要がある。一方, 伝送周波数を高周波化することでコイルの小型化が可能となるが, 供給可能な電力が制限される。ここで, 伝送周波数 f [Hz] と伝送電力 P [W] の積を新しい指標 $k_{pf} = Pf$ [W/s] として導入する。図 2 の結果をみると, 現在まで報告されている非接触給電システムは $k_{pf} < 3.3 \times 10^9$ [W/s] の領域内にプロットされる。なお, これは単にこれまで報告されたシステムが本領域に存在している



(a) Classification by topology of primary converters



(b) Classification by topology of secondary converters

Fig. 2. Relation between transmission frequency and

ことを示すだけであり, 非接触給電システムの高周波化及び大容量化の物理的な限界を意味するものではない点に注意が必要である。しかしながら, この領域内であれば非接触給電システムの開発実績があることを意味する。そのため, これから非接触給電システムの研究を始めようとする研究者・技術者には, 本領域内及び本領域の近傍で伝送電力及び伝送周波数を選択することを推奨したい。例えば, 100 kW の伝送を行う場合には, 伝送周波数が約 33 kHz 未満の非接触給電システムであれば実現性が高いといえる。反対に, 伝送周波数が標準化等の理由により 85 kHz に制限された場合には, 実現が容易な伝送電力の目安が約 39 kW であるといえる。

次に, 1 次側電力変換器の構成に着目する。図 2(a)中において, 各シンボルの違いは, 非接触給電部の駆動に使用されている 1 次側電力変換器の構成を示している。図 3 にこれらの非接触給電システムにおいて使用された変換器を示す。なお, 図中では MOSFET を用いて回路を示しているが IGBT の適用例もある。最も多く使用されている電力変換器はフルブリッジインバータであり, 次にハーフブリッジインバータへと続く。また, E 級インバータ⁽⁷¹⁾⁽⁹⁷⁾⁽¹⁰⁶⁾⁽¹²⁸⁾⁽¹²⁹⁾, ハーフブリッジインバータから派生したコンバータ⁽³¹⁾, フ

ロントエンドコンバータを含めて 1 次側変換器としてマトリクスコンバータを適用した報告例⁽¹²⁵⁾⁽¹⁵⁹⁾等もある。なお、本論文ではフルブリッジインバータの定義を「2つのLEGから構成され、LEG 1つあたり自己点弧及び自己消弧が可能なスイッチ (以下、「アクティブスイッチ」) を 2 個用いるもの」とする。また、ハーフブリッジインバータは「1つのLEGから構成され、LEG 1つあたりにアクティブスイッチを 2 個用いるもの」としている。

フルブリッジインバータの適用例に着目すると、10 kHz から 100 kHz までの周波数領域において、伝送電力が数百 W から 50 kW までの広範囲で用いられている。そもそも、フルブリッジインバータはパワーエレクトロニクス分野で最も一般的に用いられている回路であり、このような周波数帯で多くの実績があるため、適用が容易であったことが背景として考えられる。また、大容量化を図った場合にも、各スイッチングデバイスで生じる発熱が 4 つのスイッチングデバイスで均等に分担されるため、大電力伝送時にも冷却が容易である。しかしながら、スイッチングデバイスが 4 個必要とされる点や、上側スイッチのゲート駆動用に絶縁電源を用意する必要があるといった理由から、低コスト化が求められる小容量の非接触給電システムに対しては不利である。これらの観点から、フルブリッジインバータは大容量のシステムに適する。本回路自体は古くから実用化例があり、既に確立された技術である。しかしながら、制御法についてはまだ議論が十分ではない。本回路を方形波駆動する場合、電力の制御を行うためには直流電圧の制御が必要となり、前段にチョップ回路を挿入する必要がある⁽¹⁶¹⁾。一方、本回路を位相シフト制御することで出力電圧を 3 レベル波形とすれば、前段のチョップ回路なしで電力を制御できる。しかしながら、インバータで生じるスイッチング損失と高調波に起因して巻線で生じる銅損が増加する⁽¹⁹⁹⁾。これらの前段で生じる損失と、1 次側変換器で生じる損失、伝送コイルで生じる損失の全てを考慮したシステムの優劣についての議論は未だ行われておらず、今後の研究に期待したい。

ハーフブリッジインバータは特に 1 MHz 付近で 1 kW 程度の非接触給電システムにおいて用いられることが多い⁽²⁸⁾⁽⁵⁶⁾⁽¹⁶³⁾⁽¹⁷⁶⁾。しかしながら、全体の適用数ではフルブリッジインバータには及ばない。また、ハーフブリッジインバータを用いているシステムの最大伝送電力は文献⁽¹⁷⁶⁾の 3 kW であり、フルブリッジインバータと比較して比較的小容量で用いられている事例が多い。ハーフブリッジインバータは、アクティブスイッチの数が 2 個でよいという利点がある。しかしながら、ハーフブリッジインバータの出力電圧はフルブリッジインバータの 1/2 であり、電圧利用率が低い。したがって同じ直流電圧で比較した場合、同電力を得るためにはフルブリッジインバータに対して 2 倍の電流を流さなければならないため、伝送コイルの銅損とアクティブスイッチで生じる導通損失が増加する。したがって、スイッチングデバイスの電流定格は小さくはできず、低コス

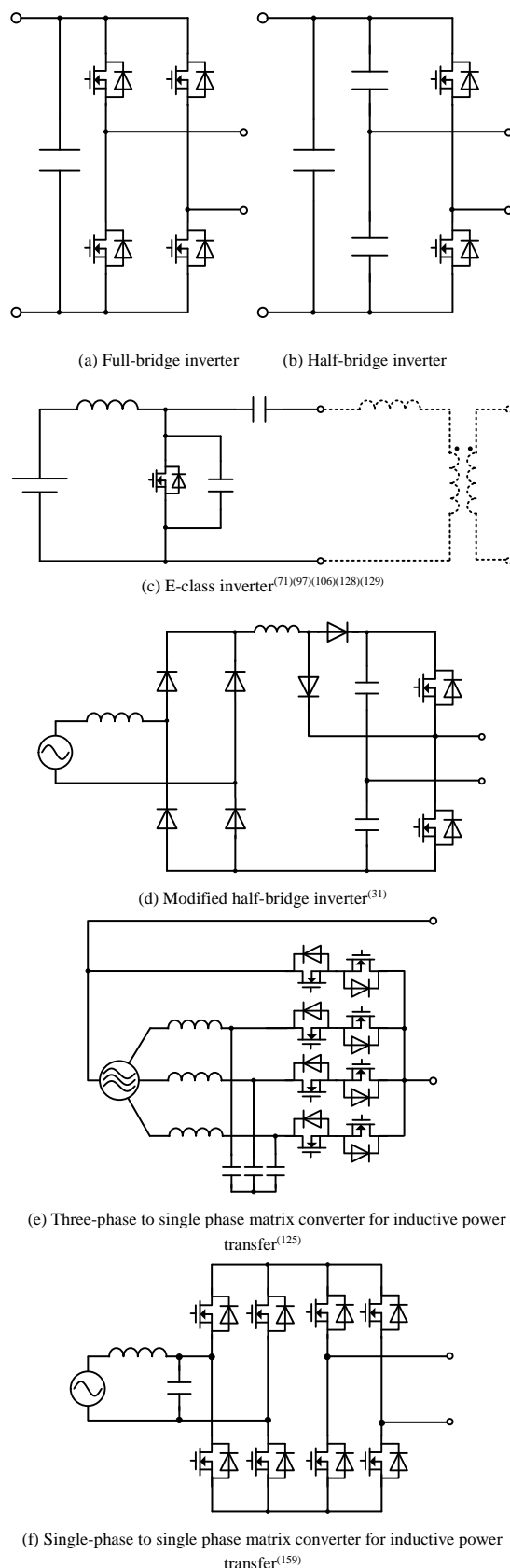


Fig. 3. Primary converters.

ト化への寄与は小さい。ただし、ソース電位がフローティングとなる素子数が 1 個となるため、駆動回路のコストは低減できる。これらの理由から、フルブリッジインバータよりも適用範囲が限定され、中容量の機器に対してハーフブリッジインバータは用いられる。

5 MHz 以上の高周波領域では線形増幅回路を用いた非接触給電システムが多く報告されている⁽⁹¹⁾⁽¹⁰¹⁾⁽¹¹²⁾⁽¹⁶⁵⁾⁽¹⁶⁹⁻¹⁷¹⁾。これは、数 MHz 以上の領域において安価なスイッチング方式の電源が一般的ではないためである。しかしながら線形増幅回路の効率は低く、A 級増幅器の理論効率は 50%、B 級増幅器を用いても理論効率は 78.5%に留まる。したがって、これらの電源を用いた場合システムの高効率化は望めない。

図 3(c)の E 級インバータは高周波の非接触給電システムへ適用されることが多い。E 級インバータはスイッチングデバイスがターンオン時にスイッチの両端電圧がゼロであり、かつ電圧波形の傾きがゼロとなる E 級スイッチングが実現できる⁽¹²⁸⁾。しかしながら、負荷によって E 級スイッチング条件を満たさない条件があり、電力変換効率が急激に低下する。本回路はスイッチングデバイスが 1 つで構成されており、スイッチのソースが主回路のグラウンド電位と共通であるため、ゲート駆動回路の絶縁がなくとも動作可能である。これらの理由から、低コスト化の要求が強い小容量のアプリケーションで主に用いられる。なお、スイッチングデバイスに印加される電圧は負荷によって変動し、入力直流電圧以上の電圧が印加されうる。したがって、スイッチングデバイスの電圧ストレスが大きくなることから、大容量化には不向きであるとされてきた。しかしながら、現在活発に開発が進められている高耐圧の Silicon Carbide (SiC) MOSFET の適用によって従来よりも大電力のシステムにおいても良好な特性を示すことが期待できる。

図 3(d)は力率改善回路と高周波インバータを一体化した回路構成である。ダイオードブリッジ整流器とハーフブリッジインバータに対して追加のスイッチングデバイスなしで力率改善動作と昇圧動作が可能であり、低コスト化に有利である。しかしながら、スイッチング周波数により電力を制御することとなるため、現在主流である共振を用いた非接触給電には適さない。また、インダクタの充電期間に流通するスイッチングデバイス数が増加するため、変換効率にも課題が残る。

図 3(e)はマトリクスコンバータを用いてフロントエンドコンバータと高周波インバータの一体化を図った回路である。PWM 整流器とフルブリッジインバータを組み合わせたシステムと比較してスイッチングデバイス数を低減でき、かつ DC リンクがないため高いパワー密度を実現できる可能性がある。しかしながら、回路動作に制約によりフロントエンドコンバータとしてのスイッチング周波数と伝送周波数が等しくなければならない。従って、伝送周波数が標準化等の観点から決定した場合には、それによってフロントエンドコンバータのスイッチング周波数が決定する。

本来フロントエンドコンバータとして最も高い効率が得られるスイッチング周波数よりも、高い伝送周波数を用いなければならない場合、変換器で生じる損失を増加させることとなる。また、文献(125)で提案されている変調法ではソフトスイッチングが実現できない。今後は、スイッチング損失を実現できるような回路構成の改善と、制御方式の確立が期待される。

図 3(f)は(e)と同様にマトリクスコンバータを用いてフロントエンドコンバータと高周波インバータの一体化を図った回路であるが、本回路では単相-単相マトリクスコンバータを用いている点に違いがある。本回路は系統側のスイッチは系統電圧極性に応じて極性切替動作のみを行うため、系統側のスイッチで生じるスイッチング損失が小さい。しかしながら、本回路では非接触給電システムの 1 次側において単相電力脈動を吸収できないため、直流負荷へ電力を供給するためには 2 次側において電力脈動を吸収する必要がある。そのため、2 次側回路に大容量のエネルギーバッ

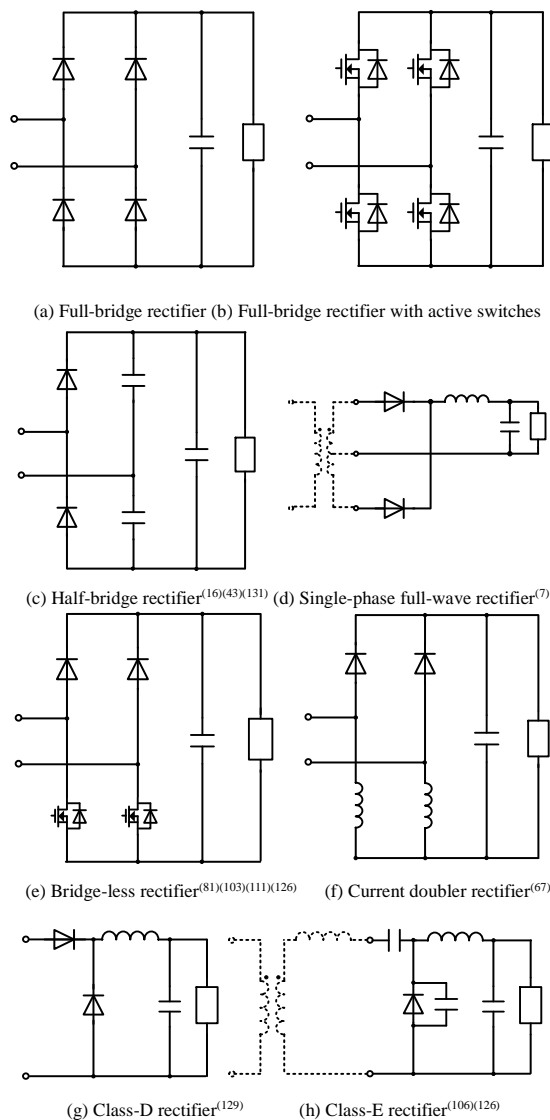


Fig. 4. Secondary converters.

ファをもつことが許容されるシステムにのみ適用が可能である。本回路をアクティブパワーデカップリング回路等の電力脈動を小容量のバッファにより吸収可能な回路と組み合わせることで、より適用可能範囲が拡大されることが期待される。

次に 2 次側電力変換器の構成に着目する。図 2(b)中において、各シンボルの違いは、非接触給電部の 2 次側に使用されている 2 次側電力変換器の構成を示している。なお、図中の白丸で示した点は、実験機器構成において整流器がブラックボックスとして描かれているものであり、ダイオードブリッジ整流器を使用していると文章及び図表から推測されるものである。また、図中において菱形で示したプロットは、2 次側電力変換器を用いず、2 次側コイルに対して直接抵抗負荷を接続してシステムの検証をしている文献を示している。これらは、1 次側電力変換器に着目した論文や、伝送コイルの特性自体に着目した論文等が該当する。

図 4 に非接触給電システムの 2 次側に使用されている変換器の一例を示す。なお、図中では各アクティブスイッチを MOSFET として示しているが、IGBT の適用例もある。2 次側電力変換器として、最も多く使用されている電力変換器はダイオードによるフルブリッジ整流器であり、次に MOSFET 等のアクティブスイッチを用いたフルブリッジ整流器、ブリッジレス整流器へと続く。また、ハーフブリッジ整流器(倍電圧整流器)⁽¹⁶⁾⁽⁴³⁾⁽¹³¹⁾、単相全波整流器⁽⁷⁾、ブリッジレス整流器⁽⁸¹⁾⁽¹⁰³⁾⁽¹¹¹⁾⁽¹²⁶⁾、倍電流整流器⁽⁶⁷⁾、D 級整流器⁽¹²⁹⁾、E 級整流器⁽¹⁰⁶⁾⁽¹²⁶⁾等の適用も報告されている。

伝送周波数によらず、図 4(a)のダイオードブリッジ整流器が広い範囲で使用されている。これは、ダイオード整流器は多くの実用化例があるため大電力のシステムでも適用が可能であることに加え、制御が不要であるため高周波領域においても適用が容易であるためである。本回路は最も単純な回路構成である反面、回路単体では制御機能がないため、制御機能を付与するために後段にチョップ回路等が接続される⁽¹⁶¹⁾。しかしながら、システム全体を通してこれらの回路の最適な設計手法は明らかにされておらず、今後の研究に期待するところである。

図 4(b)のアクティブスイッチを用いたフルブリッジ整流器に着目すると、ダイオード整流器に次いで多く用いられている。ダイオードをスイッチにすることで、同期整流による効率改善効果や、双方向非接触給電動作、出力電圧制御機能等の機能を付与する目的でダイオードをアクティブスイッチに置き換える例が多い。しかしながら、非接触給電システムは商用周波数と比較して高い周波数で駆動されることとなるため、PWM が用いられることは少なく、1 次側電力変換器と同様に 2 次側電力変換器も 1 パルス動作することが一般的である。そのため、アクティブスイッチを用いた 2 次側電力変換器は主に 10 kHz から 50 kHz の伝送周波数範囲で用いられる。PWM を用いる場合、スイッチング損失は大幅に増加することとなるが、アクティブスイッチを整流器入力電流のゼロクロスに同期してスイッチングす

る場合、スイッチング損失の増加は限定的である。なお、アクティブスイッチを用いることで同期整流動作となり、ダイオードブリッジ整流器に対して導通損失を低減できる。回路トポロジー自体は既に確立されているが、アクティブスイッチにより制御機能を付与した場合と、図 4(a)のフルブリッジ整流器にチョップ回路などの付属回路を接続した場合のどちらのシステムが効率、パワー密度の観点から優れるのかは、一般的な答えは未だ明らかにされていない。

一方、図 4(c)のハーフブリッジ整流器を用いた報告例は少なく、3 件のみである⁽¹⁶⁾⁽⁴³⁾⁽¹³¹⁾。本回路は倍電圧整流器とも呼ばれ、ダイオード 2 個でフルブリッジ整流器の倍の電圧が出力可能である。しかしながら、ダイオードに要求される耐圧が倍となることや、出力電圧リップルが増加するといった問題があり、ハーフブリッジ整流器を適用する利点は大きくない。

図 4(d)は 2 次側巻線に中間タップを設けた単相全波整流器である。本回路はダイオード 2 個で整流動作を得られるが、直流電圧は 2 次側巻線に誘起される電圧の 1/2 となる。本回路は追加で 2 次側コイルに中間タップを設ける必要があるものの、非接触給電において 2 次側コイルに中間タップを設けるのは困難ではない。一方、電流の通過素子数を考えると、フルブリッジ整流器の半分である 2 個となるため、導通損失の低減が期待できる。したがって、伝送コイルと本回路を統合的に設計することで、高効率化の可能性がある。

図 4(e)はダイオードブリッジ整流器の下側スイッチのみをアクティブスイッチにした回路であり、ブリッジレス整流器とも呼ばれる。下側スイッチは、レグ間に位相シフト制御を導入し、下側スイッチの同時オン期間を設けることで生じる 2 次側コイルの短絡期間により出力電圧を制御する用途で用いられる⁽¹⁰³⁾⁽¹¹¹⁾⁽¹⁹⁹⁾。これにより、追加デバイス無しで出力電圧の制御が可能となる利点がある。入力電流のゼロクロスを検出してスイッチングを行う場合にはスイッチング損失の増加は限定的となるが、制御方法が限定される⁽¹⁹⁹⁾。電流ゼロクロスに同期せずスイッチングを行う場合にはスイッチング損失の発生が防げない⁽¹⁰³⁾⁽¹¹¹⁾。本回路においても、フルブリッジ整流器の後段でチョップ回路を設けた場合と、ブリッジレス整流器により電圧制御を行った場合とどちらが効率面で有利であるのか、一般的には明らかにされていない。

図 4(f)は倍電流整流器である。ダイオードブリッジ整流器の上側もしくは下側ダイオードをインダクタに変更した回路となっており、入力電流に対して出力電流が倍となる点に特徴がある。しかしながら、電流リップルを抑制するために大型のインダクタが必要となることから、システムの小型化は困難である。また、これらのインダクタに電流が通流し続けるため、インダクタで生じる損失が無視できず、効率の観点からも特段の優位性を見出すことはできない。また、負荷電流の経路にインダクタと平滑コンデンサが挿入されるため、共振を用いた非接触給電システムではこの

インダクタと平滑コンデンサのインピーダンスを考慮して共振回路の設計を行わなければならない。

図 4(g)及び図 4(h)は D 級整流器及び E 級整流器である。D 級整流器はアクティブスイッチなし、E 級整流器はアクティブスイッチ 1 個で整流動作を実現できるため、高周波領域での動作に有利である。しかしながら、電流経路において通流するスイッチ数が少ないものの、出力電圧より高圧がスイッチングデバイスに印加されるため、特性の悪いデバイスを使用せざるを得ず、効率には課題を残す。このような観点から、高周波かつ小電力の機器に対して主に使用される。今後、高耐圧の SiC デバイスの発展により、大きく効率が改善される見込みがある。

〈2・3〉 結合係数 図 5 に伝送電力と伝送周波数および結合係数の関係を示す。図 5(a)が伝送電力と結合係数の関係を示しており、図 5(b)は伝送周波数と結合係数の関係を示している。結合係数と伝送電力には有意な相関はみられず、結合の良し悪しは伝送電力に影響しない。同様に、結合係数と伝送電力にも有意な相関は見られなかった。ただし、10 MHz を超える周波数帯域で結合係数 0.1 を超えた非接触給電システムは報告されていない点が特徴的である。これは、10 MHz を超える高周波帯では現在のところ有効な磁性体がなく、空芯コイルを使わざるをえなくなり、結果的に結合係数が低下しているためである。

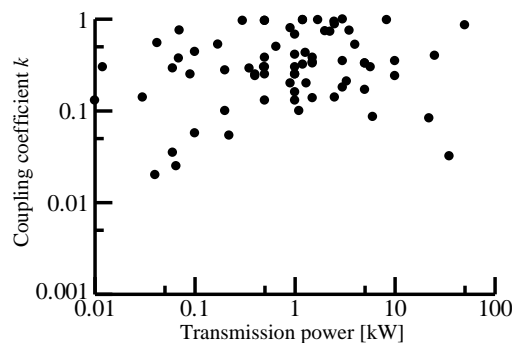
〈2・4〉 アプリケーションによる分類 図 6 にこれまで発表された文献において報告されている非接触給電システムのアプリケーションと伝送電力及び伝送周波数の関係を示す⁽⁶⁻¹⁹⁷⁾。なお、ここでは文献中に非接触給電システムのアプリケーションが明確に記載されていない文献を除外した。また、3 種類以上のアプリケーションが記載されている場合についても、特定のアプリケーションに向けた研究開発ではないとみなし、本調査では除外した。

アプリケーション別に見ると、自動車向けの非接触給電システムが最も多く報告されている。伝送電力は 1 kW から 50 kW までの範囲、伝送周波数は 10 kHz から 100 kHz までの周波数が主に用いられている。自動車向け非接触給電システムについては標準化が進められており⁽¹⁹⁸⁾、これらの周波数帯を用いた非接触給電システムの報告がこれから増加していくことが予想される。

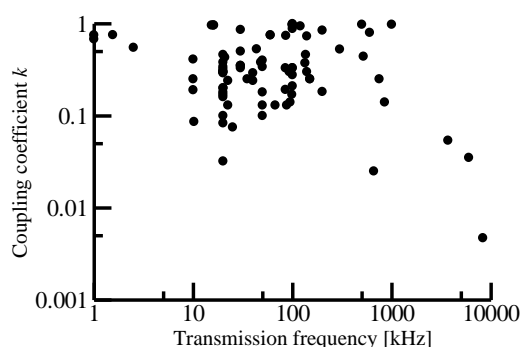
一方、エレベータや無人搬送車(AGV)などの産業機器に適用する非接触給電システムも多く報告されている。これらの機器に対する非接触給電システムの歴史は古く 1990 年代後半から開発されている。これらの時代に報告された論文が多いことから、当時のアクティブスイッチの現実的なスイッチング周波数として 10 kHz 帯でのシステムが多く報告されているものと考えられる。

また、報告数は少ないものの鉄道向け非接触給電システムも一部報告されている。前述したとおり、鉄道向けでは数十 kW から数百 kW の電力が必要となるため、10 kHz 以下の周波数を用いた非接触給電システムが多い。

家電向けの非接触給電システムについては、家電単体を



(a) Transmission power and coupling coefficient



(b) Transmission frequency and coupling coefficient

Fig. 5. Relation among coupling coefficient, transmission frequency and transmission power.

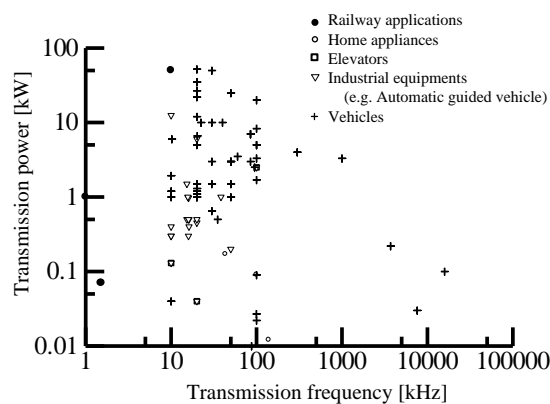


Fig. 6. Classification by applications of inductive power transfer systems.

アプリケーションとした文献が少ないため図中のプロット数は少ないものの、多くの論文で非接触給電システムの有力な適用先として挙げられている。現在のところ、家電向け非接触給電システムは特定の伝送周波数・電力に関して傾向をもっておらず、各々のアプリケーションによって決定されている。しかしながら、自動車用非接触給電システムと同様に家電類に関する非接触給電システムの標準化も検討されており⁽¹⁹⁸⁾、今後伝送周波数及び伝送電力に制限が与えられる可能性がある。

3. おわりに

本論文ではこれまで報告されている非接触給電システムについて、伝送電力、伝送周波数、結合係数及び電力変換器のトポロジーの観点から調査を行った。1980年頃から本格的に研究され始めた非接触給電システムは半導体スイッチの発展を背景に、伝送周波数の高周波化が進められてきた。特に2007年の文献(170)をきっかけとして急激に伝送周波数の高周波化が進められ、MHz帯を用いた非接触給電システムが多く報告されるようになった。しかしながら、研究が進められるにつれて、高周波化に伴う損失の増加を上回る利点を見出すのが困難となりつつあり、ここ数年このような周波数帯域を用いた非接触給電システムの研究は下火となっている。高周波化により伝送コイルの小型軽量化を狙った研究も報告されているものの、コイルの位置ずれ時の特性を考慮すると、高周波化による伝送コイルの小型化への効果は限定的である。このような背景から、電力変換器を含めて高い効率が得られる数十kHzから数百kHzの非接触給電システムが盛んに報告されている。

非接触給電システムでは、要求される伝送電力に対して伝送周波数、回路の入出力電圧や負荷条件、回路トポロジー等システム内に多くの自由度があり、効率やパワー密度の観点から最適な構成を選択することは困難である。しかしながら、これまで報告された非接触給電システムの横断的な調査から得られた結果より、伝送電力、伝送周波数、回路トポロジーの関係が明らかになった。これらを基に、これらのパラメータを決定することで、非接触給電システムの指針が得られる。例えば、数kWから数十kWのシステムでは、大容量化が容易でかつ実績のあるブリッジ構成をもつ電力変換器が有力である。今後は、この電力変換器の前段もしくは後段に接続される変換器との組み合わせ及び入出力電圧(電流)を考慮して、効率やパワー密度の議論が進むことを期待したい。

一方、家電などをアプリケーションとした数十Wから数百W程度のシステムでは、数百kHz帯が伝送周波数として多く用いられる。このような周波数帯ではブリッジ構成をもつ電力変換器に加え、スイッチング損失の低減に有利な共振型の電力変換器が適用されはじめる。共振型の電力変換器の適用範囲を拡大するためには、伝送電力の増加や、スイッチングデバイスのストレス低減技術の確立が必要となる。

さらに小容量かつ高周波(MHz)のアプリケーションでは、スイッチング損失及び導通損失低減を簡易な回路構成で実現するため、通過素子数の少ないE級インバータなどが利用される。これらの変換器においては、大容量化に向けたスイッチングデバイスのストレス低減技術や、共振パラメータ変動に対するロバスト性の確保を期待したい。これらの回路においては高耐圧のSiCデバイスの発展によりこれまで実用化が難しかった大電力非接触給電システムへの適用が可能となる期待がある。

本論文ではさらに、結合係数と伝送電力・伝送周波数の関係性を示した。その結果、結合係数と伝送電力・伝送周波数に有意な相関はみられなかった。これは、結合係数によらず所望の電力を任意の伝送周波数で伝送可能であることを意味する。ただし、本論文では効率については議論していないため、必ずしも高効率な伝送を保証するものではない。

なお、非接触給電システムの動向について議論する上で標準化について言及する必要がある。電気自動車や家電などの非接触給電システムでは、現在標準化が進められており、伝送周波数として使用可能な周波数帯域が限定される見通しである。標準化の観点から、現状では乗用自動車に対する非接触給電システムの最大伝送電力は7.7kW程度であり、これまで報告された非接触給電システムも7.7kW未満のシステムが多い。しかしながら、これまでの電力変換技術の歴史を考えると、機器の消費電力は開発当初想定されていた電力から増加する傾向にある。例えば、有線式の電気自動車用充電器では当初普通充電が3.3kWとされていたものの、急速充電への対応で50kW、さらに超急速充電として定格120kWの充電器が開発、使用され始めている。このような大容量化の流れにおいて、非接触給電システムのみが現状の伝送電力7.7kWを維持していたのでは到底システムの普及は望めない。したがって、電気自動車向け非接触給電システムにおいては、伝送電力の大容量化及び、大容量化に伴って生じる伝導・放射ノイズ、放熱対策、人体防護等の技術が盛んに研究されていくことを期待したい。

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) T. Imura, Y. Hori: "Unified Theory of Electromagnetic Induction and Magnetic Resonant Coupling", IEEJ Trans. D, Vol. 135, No. 6, pp. 697-710 (2015)
- (6) H. Ayano, H. Nagase, H. Inaba: "Highly Efficient Contactless Electrical Energy Transmission System", IEEJ Trans. D, Vol. 123, No. 3, pp. 263-270 (2003)
- (7) H. Abe, H. Sakamoto, K. Harada: "A Nobel Method of Output Voltage Stabilization with Respect to Load Current Variation in the Non-Contact Energy Transfer", IEEJ Trans. D, Vol. 123, No. 11, pp. 1285-1294 (2003)
- (8) Y. Kaneko, S. Matsushita, Y. Oikawa, S. Abe: "Moving Pick-Up Type Contactless Power Transfer Systems and their Efficiency Using Series and Parallel Resonant Capacitors", IEEJ Trans. D, Vol. 128, No. 7, pp. 919-925 (2008)
- (9) H. Irie, N. Minami, H. Minami, H. Kitayoshi: "Non-Contact Energy Transfer System Using Imittance Converter", IEEJ Trans. D, Vol. 120, No. 6, pp. 789-794 (2000)
- (10) H. Abe, H. Sakamoto, K. Harada: "Load matching for Non-Contact Charging

- System”, IEEJ Trans. D, Vol. 119, No. 4, pp. 536-543 (1999)
- (11) H. Irie, H. Taike, H. Minami, H. Kitayoshi: “Equivalent Circuit of Pick-Up-Coil in Non-Contact Energy Transfer System”, IEEJ Trans. D (letter), Vol. 118, No. 10, pp. 1228-1229 (1998)
- (12) H. Irie, Y. Tahatra: “Cascade Configuration of T-LCL-Type and T-CLC-Type Imittance Converters in Non-Contact Energy Transfer Systems”, IEEJ Trans. D, Vol. 129, No. 5, pp. 511-518 (2009)
- (13) Y. Kaneko, N. Ehara, T. Iawata, S. Abe, T. Yasuda, K. Ida: “Comparison of Transformer Winding Methods for Contactless Power Transfer Systems of Electric vehicle”, IEEJ Trans. D, Vol. 130, No. 6, pp. 734-741 (2010)
- (14) H. Matsumoto, Y. Neba, K. Ishizaka, R. Itoh: “3-phase Contactless Power Transfer System Tacking Account of Mutual Inductance”, IEEJ Trans. D (letter), Vol. 130, No. 8, pp. 1039-1040 (2010)
- (15) S. Shindo, Y. Terae, I. Ando, K. Ohishi, M. Ogawa, H. Takano: “A Method of Single Phase High Frequency Inverter Based on Tracking Control to Load Resonant Frequency”, IEEJ Trans. D, Vol. 131, No. 8, pp. 1078-1086 (2011)
- (16) M. Chigira, Y. Nagatsuk, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, A. Suzuki: “Novel Core Structure and Iron-loss Modeling for Contactless Power Transfer System of Electric Vehicle”, IEEJ Trans. D, Vol. 132, No. 1, pp. 9-16 (2012)
- (17) T. Tohi, Y. Kaneko, S. Abe: “Maximum Efficiency of Contactless Power Transfer Systems using k and Q ”, IEEJ Trans. D (letter), Vol. 132, No. 1, pp. 123-124 (2012)
- (18) K. Takuzaki, N. Hoshi: “Consideration of Operating Condition of Secondary-side Converter of Inductive Power transfer System for Obtaining High Resonant Circuit Efficiency”, IEEJ Trans. D, Vol. 132, No. 10, pp. 966-975 (2012)
- (19) H. Matsumoto, Y. Neba, K. Ishizaka, R. Itoh: “Power Factor Compensator for Contactless Power transfer System Connecting to Full-Bridge Diode Rectifier”, IEEJ Trans. D, Vol. 133, No. 6, pp. 618-626 (2013)
- (20) S. Kawano, E. Hiraki, T. Tanaka, M. Okamoto: “A High-Frequency Link AC-AC Converter for Contactless Power Supply System in Parking Tower”, IEEJ Trans. D, Vol. 134, No. 2, pp. 139-146 (2014)
- (21) H. Matsumoto, R. Nakashima, Y. Neba, H. Asahara: “Proposal and Verification of Two-Layer Three-Phase Contactless Power transformer”, IEEJ Trans. D, Vol. 135, No. 5, pp. 539-547 (2015)
- (22) T. Kai, K. Throngnumchai: “A Study on Receiver Circuit Topology of non-contact Charger for Electric Vehicle”, IEEJ Trans. D, Vol. 132, No. 11, pp. 1048-1054 (2012)
- (23) K. Yamamoto, T. Maruyama, K. Kondo, T. Kashiwagi: “A Method for Designing a High-Power Contactless Power Transformer Considering Reactive Power”, IEEJ Trans. D, Vol. 133, No. 3, pp. 378-385 (2013)
- (24) S. Kitazawa, K. Kondo, T. Kashiwagi: “An Evaluation of Power Flow Control of the Power Conversion Circuit for Contactless Power Transformer System at the Coil Misalignment”, IEEJ Trans. D, Vol. 133, No. 5, pp. 518-525 (2013)
- (25) S. Mochizuki, S. Nakadachi, H. Watanabe, S. Sakaino, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda: “Bidirectional Contactless Power Transfer System expandable from Unidirectional Systems”, IEEJ Trans. D, Vol. 133, No. 7, pp. 707-713 (2013)
- (26) Y. Nakata, J. Itoh: “PDM Control Method for a Matrix Converter Converting Several-Hundred-kHz Single-Phase Input to Commercial Frequency Three-Phase Output”, IEEJ Trans. D, Vol. 134, No. 1, pp. 41-48 (2014)
- (27) T. Yamanaka, I. Fujita, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda: “Cooling Structure for Large Capacity H-shaped Core Contactless Power Transformers for Electric Vehicles”, IEEJ Trans. D, Vol. 134, No. 3, pp. 370-375 (2014)
- (28) S. Ojika, Y. Miura, T. Ise: “Evaluation of Inductive Contactless Power Transfer Outlet with Coaxial Coreless Transformer”, IEEJ Trans. D, Vol. 135, No. 1, pp. 49-57 (2015)
- (29) H. Abe, T. Akiyama, M. Ozaki, H. Kohara: “Simple Equivalent Circuit for a Wireless Power Transfer System Using a Repeating Coil and Effects Confirming the Simplification in the Output Voltage Estimation”, IEEJ Trans. D, Vol. 135, No. 6, pp. 679-688 (2015)
- (30) H. Matsuoka, S. Watanabe, T. Koseki: “Research on the Characteristic Change in an Inductive-coupling-type Contactless Power Transformer for a Railway According to the Core Shapes and Misalignment Utilizing a T-type Equivalent Circuit”, IEEJ Trans. D, Vol. 135, No. 7, pp. 746-754 (2015)
- (31) K. Sugimori, H. Sakamoto, K. Harada: “One Converter Type Contact-less Charger for Electric Vehicles”, IEEJ Trans. D, Vol. 118, No. 11, pp. 1253-1259 (1998)
- (32) F. Anan, K. Yamasaki, K. Harada, H. Sakamoto, K. Sugimori, M. Inoh: “A Charger with a Magneto-Inductive Connector”, IEEJ Trans. D, Vol. 116, No. 3, pp. 245-250 (1995)
- (33) T. Nishimura, T. Eguchi, T. Inoue, M. Saito, Y. Maejima, M. Majima, K. Hirachi: “A Transcutaneous Power Supply System for a Rechargeable Cardiac Pacemaker Battery”, IEEJ Trans. D, Vol. 117, No. 9, pp. 1085-1091 (1997)
- (34) D. Gunji, T. Imura, H. Fujimoto: “Fundamental Research on Control Method for Power Conversion Circuit of Wireless In-Wheel Motor using Magnetic Resonance Coupling”, IEEJ Trans. D, Vol. 135, No. 3, pp. 182-191 (2015)
- (35) K. Shimamura, M. Koizumi, Y. Mizuno, K. Komurasaki: “Effect of Axial Slit on metallic Tube for Wireless Power Transfer Via Magnetic Resonance Coupling -Application of Magnetic-Resonance Coupling Techniques for Infrastructure Diagnostics-”, IEEJ Trans. D, Vol. 135, No. 7, pp. 787-793 (2015)
- (36) J. Shibata, K. Kaneko, K. Ohishi, I. Ando, M. Ogawa, H. Takano: “Fine Output Voltage Control Method considering Time-Delay of Digital Inverter System for X-ray Computed Tomography”, IEEJ Trans. D, Vol. 131, No. 11, pp. 1331-1337 (2011)
- (37) T. Mizuno, T. Ueda, S. Yachi, R. Ohtomo, Y. Goto: “Dependence of Efficiency on Wire Type and Number of Strands of Litz Wire for Wireless Power Transfer of Magnetic Resonant Coupling”, IEEJ Journal of Industry Application, Vol. 3, No. 1, pp. 35-40 (2014)
- (38) T. Hiramatsu, H. Xiaoliang, M. Kato, T. Imura, Y. Hori: “Experimental Verification of Feedforward Controller for Wireless Charging Power Control through Receiver Side Voltage Control”, IEEJ JIASC2014, No. 2-13 (2014)
- (39) T. Matsumura, Y. Kaneko, S. Abe: “An Operating Method of Inverter with Capacitive Load in Wireless Charger for Electric Vehicles”, IEEJ JIASC2013, No. 4-6 (2013)
- (40) M. Jo, Y. Sato, Y. Kaneko, S. Abe: “Reduction of Harmonic Current Flowing Transformer of Wireless Charging System for Electric vehicles”, IEEJ JIASC2013, No. 4-7 (2013)
- (41) I. Fujita, T. Yamanaka, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, A. Suzuki: “Large Capacity Contactless Power Transformer for Electric Vehicle Using Multiple Module Configuration”, IEEJ JIASC2012, No. 4-9 (2012)
- (42) K. Okada, N. Hoshi, J. Haruna: “Frequency Characteristic for Inductive Power Transfer System”, IEEJ JIASC2012, No. Y-54 (2012)
- (43) H. Takanashi, T. Yamanaka, M. Chigira, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, A. Suzuki: “Compact Contactless Power Transformer for Electric Vehicle 3kW Charger”, IEEJ JIASC2011, No. 2-12 (2011)
- (44) K. Imura, N. Hoshi, J. Haruna: “Loss Evaluation of Moving Type Inductive Power Transfer System with LCL Circuit”, IEEJ JIASC2011, No. Y-48 (2011)
- (45) Y. Moriwaki, T. Imura, Y. Hori: “A Study on Reduction of Reflected Power Using DC/DC Converter in Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling”, IEEJ JIASC2011, No. 2-10 (2011)
- (46) K. Wakasugi, T. Isobe, R. Shimada: “Highly Efficient Non-Contact Energy Transfer Systems Using a Magnetic Energy Recovery Switch”, IEEJ JIASC2010, No. 1-42 (2010)
- (47) Y. Tahara, H. Irie: “Cascade Configuration of T-LCL Type and T-CLC Type Imittance Converter in Non-Contact energy Transfer System”, IEEJ JIASC2007, No. 1-84 (2007)
- (48) A. Asami, H. Irie: “Comparison of characteristics for connections of pick-up in non-contact energy transfer system”, IEEJ JIASC2006, No. 1-118 (2006)
- (49) A. Asami, H. Irie: “Series Resonance and Parallel Resonance of Receipt Device for Non-Contact Energy Transfer System”, IEEJ JIASC2005, No. Y-100 (2005)
- (50) H. Abe: “A Simple Method of Output Voltage Stabilization Suited to the Output Rectifier Circuit in the Non-Contact Energy Transfer”, IEEJ JIASC2003, No. 1-18 (2003)
- (51) Y. Yamane, H. Irie: “Characteristics of Non-Contact Energy Transfer System for Changing the Shape of the Core”, IEEJ JIASC2003, No. 2-26 (2003)
- (52) M. Nishimura, A. Kawamura: “Fundamental Study on Contact-less power transmission for a high speed railway”, IEEJ JIASC2003, No. Y-43 (2003)
- (53) T. Yabuuchi, H. Irie: “High Frequency Constant-Current Power Supply for Non-Contact Energy Transfer System”, IEEJ JIASC2003, No. Y-42 (2003)
- (54) D. Gunji, T. Imura, H. Fujimoto: “Study of Power Conversion Circuit Structure Appropriate for Control Purpose on Wireless Power Transfer”, IEEJ SPC, No. SPC-15-17 (2015)
- (55) R. Ota, N. Hoshi, J. Haruna: “Design of Compensation Capacitor in S/P Topology of Inductive Power Transfer System with Buck or Boost Converter on Secondary Side”, IEEJ Journal of Industry Application, Vol. 4, No. 4, pp.

- 476-485 (2015)
- (56) Y. Hayashi, H. Toyoda, T. Ise: "Contactless DC Connector Concept for High-Power-Density 380-V DC Distribution System", IEEJ Journal of Industry Application, Vol. 4, No. 1, pp. 49-58 (2015)
- (57) K. Konishi, T. Mishima, M. Nakaoka: "A Time-Sharing Principle-based Frequency Doubler ZCS High Frequency-Resonant Inverter for Inductive Power Transfer -The First Report on the Experimental Evaluation-", IEICE Technical Report, No. EE2015-8 (2015)
- (58) K. Ukita, T. Kashiwagi, Y. Sakamoto, Y. Kato, H. Yoda, T. Sasakawa: "Verification of Non-contact Power Supply System for Railways Using a Test Vehicle", IEEJ Annual meeting 2015, No. 5-128 (2015)
- (59) A. Matsushita, N. Tada, H. Ishihara: "Verification test of 7kW Class Contactless Power Transfer system", IEEJ Annual meeting 2015, No. 4-156 (2014)
- (60) H. Toita, T. Takizawa, T. Kobari, J. Sagawa, N. Ariyoshi, T. Kaneko, et. Al.: "The Development of 50kW Inductive Power Supply System for the daily Root Bus.", IEEJ Annual meeting 2014, No. 4-083 (2014)
- (61) K. Iimura, N. Hoshi, J. Haruna: "Constant Voltage Output Control Methods of Parallel-Parallel Compensated Inductive Power Transfer", IEEJ Annual meeting 2013, No. 4-005 (2013)
- (62) K. Okada, K. Iimura, N. Hoshi: "Comparison of Primary Compensation Topologies for Inductive Power Transfer System", IEEJ Annual meeting 2012, No. 4-103 (2012)
- (63) H. Iura, H. Matsumoto, Y. Neba, K. Ishizaka, R. Itoh: "PFC Topology with Suppression of Input Harmonics in Contactless Power Transfer System", IEEJ Annual meeting 2012, No. 4-106 (2012)
- (64) S. Kawano, M. Okamoto, E. Hiraki, T. Tanaka: "Experimental verification of High-Frequency-link AC-AC Converter for Non-contact Power Supply System in Parking Tower", IEEJ Annual meeting 2012, No. 4-107 (2012)
- (65) S. Abe, K. Kanai, Y. Kaneko, S. Abe: "Three-phase Moving Pick-Up Type Contactless Power Transfer Systems", IEEJ Annual meeting 2012, No. 4-155 (2010)
- (66) N. Ehara, T. Iwata, T. Tsuji, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda: "Characteristics of Contactless Power Transfer System Equipped with Aluminum-plate Leakage Flux Shield", IEEJ Annual meeting 2008, No. 4-196 (2008)
- (67) T. Yamaji, F. Jin, K. Fujiwara, Y. Ishihara, T. Todaka, K. Sakaguchi, et. Al.: "Contact-less power transfer system based on the parallel resonance and current doubler", IEEJ Annual meeting 2007, No. 4-035 (2007)
- (68) A. Asami, H. Irie: "Non-Contact Power Transfer With a Pick-Up With Has Immittance Converter Characteristics", IEEJ Annual meeting 2006, No. 4-221 (2006)
- (69) H. Sakamoto, K. Harada, S. Washimiya, K. Takehara, Y. Matsuo, F. Nakao: "Large Air-Gap Coupler for Inductive Charger", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 3526-3528 (1999)
- (70) B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, S. C. Goldstein: "Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 24, No. 7, pp. 1819-1825 (2009)
- (71) Z. N. Low, R. A. Chinga, R. Tseng, J. Lin: "Design and Test of a High-Power High-Efficiency Loosely Coupled Planar Wireless Power Transfer System", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 56, No. 5, pp. 1801-1812 (2009)
- (72) J. W. Hsu, A. P. Hu, A. Swain: "A Wireless Power Pickup Based on Directional Tuning Control of Magnetic Amplifier", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 56, No. 7, pp. 2771-1781 (2009)
- (73) S. Lee, R. D. Lorenz: "Development and Validation of Model for 95%-Efficiency 220-W Wireless Power Transfer Over a 30-cm Air Gap", IEEE Tran. On Industry Applications, Vol. 47, No. 6, pp. 2495-2504 (2011)
- (74) J. Park, Y. Tak, Y. Kim, Y. Kim, S. Nam: "Investigation of Adaptive Matching Methods for Near-Field Wireless Power Transfer", IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol. 59, No. 5, pp. 1769-1773 (2011)
- (75) J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, C. T. Rim: "Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 26, No. 12, pp. 3666-3679 (2011)
- (76) T. Imura, Y. Hori: "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using equivalent Circuit and Neumann Formula", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 58, No. 10, pp. 4746-4752 (2011)
- (77) J. Wang, J. Li, S. L. Ho, W. Y. Chau, W. K. Lee, W. N. Fu, et. Al.: "Study and Experimental Verification of a Rectangular Printed-Circuit-Board Wireless Transfer System for Low Power Devices", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 48, No. 11, pp. 3013-3016 (2012)
- (78) H. Zeng, S. Yang, F. Peng: "Wireless power transfer via harmonic current for Electric Vehicles Application", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 13th, pp. 592-596 (2015)
- (79) F. Lu, H. Hofmann, J. Deng, C. Mi: "Output Power and Efficiency Sensitivity to Circuit Parameter Variations in Double-Sided LCC-Compensated Wireless Power Transfer System", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 13th, pp. 597-601 (2015)
- (80) B. Wunsch, J. Bradshaw, I. Stevanovic, F. Canales, W. Van-der-Merwe: "Inductive power transfer for auxiliary power of medium voltage converters", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 13th, pp. 2551-2556 (2015)
- (81) E. Asa, K. Colak, M. Bojarski, D. Czarkowski: "A Novel Phase Control of Semi Bridgeless Active Rectifier for Wireless Power Transfer Applications", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 13th, pp. 3225-3231 (2015)
- (82) K. Hata, T. Imura, Y. Hori: "Maximum Efficiency Control of Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling Considering Dynamics of DC-DC Converter for Moving Electric Vehicles", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 13th, pp. 3301-3306 (2015)
- (83) J. Hou, Q. Chen, S. Wong, X. Ren, X. Ruan: "Output Current Characterization of Parallel-Series/Series Compensated Resonant Converter for Contactless Power Transfer", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 13th, pp. 1625-1629 (2015)
- (84) H. Ishihara, F. Moritsuka, A. Matsushita, S. Otake: "A Voltage Ratio-based Efficiency Control Method for 3 kW Wireless Power Transmission", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 12th, pp. 1312-1316 (2014)
- (85) K. Orikawa, Y. Fujita, J. Itoh: "Investigation for High Output of 2.5MHz Power Supply Constructed from Multi-Core Transformers and a Multi-Phase Inverter and Application for Wireless Power Transfer", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 12th, pp. 1329-1335 (2014)
- (86) C. Zhao, Z. Wang, J. Du, J. Wu, S. Zong, X. He: "Active Resonance Wireless Power Transfer System Using Phase Shift Control Strategy", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 12th, pp. 1336-1341 (2014)
- (87) N. Liu, B. Wang: "An LLC-Based Planar Wireless Power Transfer System for Multiple Devices", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 12th, pp. 3411-3417 (2014)
- (88) R. Bosshard, J. W. Kolar, B. Wunsch: "Accurate Finite-Element Modeling and Experimental Verification of Inductive Power Transfer Coil Design", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 12th, pp. 1648-1653 (2014)
- (89) R. Chen, C. Zheng, Z. U. Zahid, E. Faraci, M. Senesky, D. Anderson, G. Ili: "Analysis and Parameters Optimization of a Contactless IPT System for EV Charger", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 12th, pp. 1654-1661 (2014)
- (90) J. Huh, W. Lee, G. Cho, B. Lee, C. Rim: "Characterization of Nonvel Inductive Power Transfer Systems for On-Line Electric Vehicles", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 11th, pp. 1975-1979 (2013)
- (91) A. P. Sample, D. A. Meyer, J. R. Smith: "Analysis, Experimental Results, and Range Adaption of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 58, No. 2, pp. 544-554 (2011)
- (92) W. Zhong, C. K. Lee, S. Y. R. Hui: "General Analysis on the Use of Tesla's Resonators in Domino Forms for Wireless Power Transfer", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, pp. 261-170 (2013)
- (93) D. Ahn, S. Hong: "Effect of Coupling Between Multiple Transmitters or Multiple Receivers on Wireless Power Transfer", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 7, pp. 2602-2613 (2013)
- (94) D. Ahn, S. Hong: "A Study on Magnetic Field Repeater in Wireless Power Transfer", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, pp. 360-371 (2013)
- (95) T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, Y. Hori: "Automated Impedance Matching System for Robust Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 9, pp. 3689-3698 (2013)
- (96) M. J. Neath, A. K. Swain, U. K. Madawala, D. J. Thrimawithana: "An Optimal PID Controller for a Bidirectional Inductive Power Transfer System Using Multiobjective Genetic Algorithm", IEEE Trans. On Power

- Electronics, Vol. 29, No. 3, pp. 1523-1531 (2014)
- (97) S. Aldhafer, P. C. Luk, A. Bati, J. F. Whidborne: "Wireless Power Transfer Using Class E Inverter With Saturable DC-Feed Inductor", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 50, No. 4, pp. 2710-2718 (2014)
- (98) K. E. Koh, T. C. Beh, T. Imura, Y. Hori: "Impedance Matching and Power Division Using Impedance Inverter for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 50, No. 3, pp. 2061-2070 (2014)
- (99) Q. Zhu, L. Wang, C. Liao: "Compensate Capacitor Optimization for Kilowatt-Level Magnetically Resonant Wireless Charging System", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 61, No. 12, pp. 6758-6768 (2014)
- (100) S. Y. Choi, B. W. Gu, S. W. Lee, W. Y. Lee, J. Huh, C. T. Rim: "Generalized Active EMF Cancel Methods for Wireless Electric Vehicles", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 29, No. 11, pp. 5770-5783 (2014)
- (101) M. Fu, C. Ma, X. Zhu: "A Cascaded Boost-Buck Converter for High-Efficiency Wireless Power Transfer Systems", IEEE Trans. On Industrial Informatics, Vol. 10, No. 3, pp. 1972-1980 (2014)
- (102) W. Li, H. Zhao, S. Li, J. Deng, T. Kan, C. C. Mi: "Integrated LCC compensation topology for Wireless Charger in Electric and Plug-in Electric Vehicles", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 62, No. 7, pp. 4215-4225 (2015)
- (103) T. Diekhans, R. W. D. Doncker: "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6320-6328 (2015)
- (104) S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen, C. C. Mi: "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer", IEEE Trans. On Vehicular Technology, Vol. 64, No. 6, pp. 2261-2273 (2015)
- (105) S. Li, C. C. Mi: "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 4-17 (2015)
- (106) S. Aldhafer, P. C. Luk, K. E. K. Drissi, J. F. Whidborne: "High-Input-Voltage High-Frequency Class E Rectifiers for Resonant Inductive Links", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 3, pp. 1328-1335 (2015)
- (107) 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)
- (108) W. X. Zhong, S. Y. R. Hui: "Maximum Energy Efficiency Tracking for Wireless Power Transfer Systems", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 7, pp. 4025-4034 (2015)
- (109) H. Li, J. Li, K. Wang, W. Chen, X. Yang: "A Maximum Efficiency Point Tracking Control Scheme for Wireless Power Transfer Systems Using Magnetic Resonant Coupling", Vol. 30, No. 7, pp. 3998-4008 (2015)
- (110) Z. Pantic, K. Lee, S. M. Lukic: "Receivers for Multifrequency Wireless Power Transfer: Design for Minimum Interference", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 234-241 (2015)
- (111) K. Colak, E. Asa, M. Bojarski, D. Czarkowski, O. C. Onar: "A Novel Phase-Shift Control of Semibrigeless Active Rectifier for Wireless Power Transfer", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6288-6297 (2015)
- (112) M. Fu, H. Yin, X. Zhu, C. Ma: "Analysis and Tracking of Optimal Load in Wireless Power Transfer Systems", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 7, pp. 3952-3963 (2015)
- (113) J. Lee, B. Han: "A Bidirectional Wireless Power Transfer EV Charger Using Self-Resonant PWM", IEEE Trans. On Power Electronics (Letter), Vol. 30, No. 4, pp. 1784-1791 (2015)
- (114) A. Berger, M. Agostinelli, S. Vesti, J. A. Oliver, J. A. Cobos, M. Huemer: "A Wireless Charging System Applying Phase-Shift and Amplitude Control to Maximize Efficiency and Extractable Power", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6338-6348 (2015)
- (115) J. T. Boys, G. A. Covic, Y. Xu: "DC Analysis Technique for Inductive Power Transfer Pick-Ups", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 1, No. 2, pp. 51-53 (2003)
- (116) C. Wang, G. A. Covic, O. H. Stielau: "Investigating an LCL Load Resonant Inverter for Inductive Power Transfer Application", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 19, No. 4, pp. 995-1002 (2004)
- (117) C. Wang, G. A. Covic, O. H. Stielau: "Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 51, No. 1, pp. 148-157 (2004)
- (118) G. A. Covic, J. T. Boys, M. L. G. Kissin, H. G. Lu: "A Three-Phase Inductive Power Transfer System for Roadway-Powered Vehicles", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 54, No. 6, pp. 3370-3378 (2007)
- (119) N. A. Keeling, G. A. Covic, J. T. Boys: "A Unity-Power-Factor IPT Pickup for High-Power Application", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 57, No. 2, pp. 744-751 (2010)
- (120) H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, D. Bronson: "A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control", IEEE Trans. On Industrial Informatics, Vol. 8, No. 3, pp. 585-595 (2012)
- (121) U. K. Madawala, M. Neath, D. J. Thrimawithana: "A Power-Frequency Controller for Bidirectional Inductive Power Transfer Systems", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, pp. 310-317 (2013)
- (122) M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, C. Huang: "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, pp. 318-328 (2013)
- (123) D. J. Thrimawithana, U. K. Madawala, M. Neath: "A Synchronization Technique for Bidirectional IPT Systems", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 1, pp. 301-309 (2013)
- (124) D. J. Thrimawithana, U. K. Madawala: "A Generalized Steady-State Model for Bidirectional IPT Systems", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 28, No. 10, pp. 4681-4689 (2013)
- (125) N. X. Bac, D. M. Vilathgamuwa, U. K. Madawala: "A SiC-Based Matrix Converter Topology for Inductive Power Transfer System", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 29, No. 8, pp. 4029-4038 (2014)
- (126) G. R. Nagendra, G. A. Covic, J. T. Boys: "Determining the Physical Size of Inductive Couplers for IPT EV Systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 2, No. 3, pp. 571-583 (2014)
- (127) R. Haldi, K. Schenk: "A 3.5 kW Wireless Charger for Electric Vehicles with Ultra High Efficiency", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2014, pp. 668-674 (2014)
- (128) H. Sekiya, T. Suetsugu, K. Shirota: "Loosely Coupled Inductive Wireless Power Transfer Systems with Class-E Transmitter and Multiple Receivers", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2014, pp. 675-680 (2014)
- (129) P. C. K. Luk, S. Aldhafer: "Analysis and Design of a Class D Rectifier for a Class E Driven Wireless Power Transfer System", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2014, pp. 851-857 (2014)
- (130) M. Jo, Y. Sato, Y. Kaneko, S. Abe: "Methods for Reducing Leakage Electric Field of a Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2014, pp. 1762-1769 (2014)
- (131) H. Takanashi, Y. Sato, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda: "A Large Air Gap 3 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2012, pp. 269-274 (2012)
- (132) H. H. Wu, A. Gilchrist, K. Sealy, D. Bronson: "A 90 Percent Efficient 5kW Inductive Charger for EVs", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2012, pp. 275-282 (2012)
- (133) A. Zaheer, D. Kacprzak, G. A. Covic: "A Bipolar Receiver Pad in a Lumped IPT System for Electric Vehicle Charging Applications", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2012, pp. 283-290 (2012)
- (134) F. Musavi, M. Edington, W. Eberle: "Wireless Power Transfer: A Survey of EV Battery Charging Technologies", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2012, pp. 1804-1810 (2012)
- (135) I. Nam, R. Dougal, En Santi: "Novel Control Approach to Achieving Efficient Wireless Battery Charging for Portable Electronic Devices", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2012, pp. 2482-2891 (2012)
- (136) E. Waffenschmidt: "Free positioning for inductive wireless power system", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2011, pp. 3480-3487 (2011)
- (137) J. O. Mur-Miranda, G. Fanti, Y. Feng, K. Omanakuttan, R. Ongie, A. Setjoadi, W. Franklin: "Wireless Power Transfer Using Weakly Coupled Magnetostatic Resonators", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2010, pp. 4179-4186 (2011)
- (138) J. Huh, S. Lee, C. Park, G. Cho, C. Rim: "High Performance Inductive Power Transfer System with Narrow Rail Width for On-Line Electric Vehicles", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2010, pp. 647-651 (2010)
- (139) S. Lee, J. Huh, C. Park, N. Choi, G. Cho, C. Rim: "On-Line Electric Vehicle using Inductive Power Transfer System", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2010, pp. 1598-1601 (2010)

- (140) G. A. Covic, J. T. Boys, A. M. W. Tam, J. C. H. Peng: "Self Tuning Pick-ups for Inductive Power Transfer", IEEE 39th Annual Power Electronics Specialist Conference, pp. 3489-3494 (2008)
- (141) J. T. Boys, C. Y. Huang, G. A. Covic: "Single-Phase Unity Power-Factor Inductive Power Transfer System", IEEE 39th Annual Power Electronics Specialist Conference, pp. 3701-3706 (2008)
- (142) S. Raabe, J. T. Boys, G. A. Covic: "A High Power Coaxial Inductive Power Transfer Pickup", IEEE 39th Annual Power Electronics Specialist Conference, pp. 4320-4325 (2008)
- (143) S. Kitazawa, K. Kondo, T. Kashiwagi: "Study on a Control Method of the Power Converter for Constant Power Transmission by Single-pulse PWM mode", 15th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-9 (2013)
- (144) H. Omori, Y. Iga, T. Morizane, N. Kimura, K. Nakagawa, M. Nakaoka: "A Novel Wireless EV Charger using SiC Single-Ended Quasi-Resonant Inverter for Home Use", 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, No. LS8b.2, pp. 1-9 (2012)
- (145) H. Hao, G. A. Covic, J. T. Boys: "An Approximate Dynamic Model of LCL-T-Based Inductive Power Transfer power Supplies", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 29, No. 10, pp. 5554-5567 (2014)
- (146) H. Hao, G. A. Covic, J. T. Boys: "A Parallel Topology for Inductive Power Transfer Power Supplies", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 29, No. 3, pp. 1140-1151 (2014)
- (147) A. Zaheer, G. A. Covic, D. Kacprzak: "A Bipolar Pad in a 10-kHz 300-W Distributed IPT System for AGV Applications", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 61, No. 7, pp. 3288-3301 (2014)
- (148) W. Zhang, S. Wong, C. K. Tse, Q. Chen: "Design for Efficiency Optimization and Voltage Controllability of Series-Series Compensated Inductive Power Transfer Systems", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 29, No. 1, pp. 191-200 (2014)
- (149) J. E. James, D. J. Robertson, G. A. Covic: "Improved AC Pickups for IPT Systems", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 29, No. 12, pp. 6361-6374 (2014)
- (150) Z. Pantic, K. Lee: "Multifrequency Inductive Power Transfer", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 29, No. 11, pp. 5995-6005 (2014)
- (151) Z. Cheng, Y. Lei, K. Song, C. Zhu: "Design and Loss Analysis of Loosely Coupled Transformer for an Underwater High-Power Inductive Power Transfer System", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 51, No. 7, pp. 8401110 (2015)
- (152) J. T. Boys, G. A. Covic: "The Inductive Power Transfer Story at the University of Auckland", IEEE Circuits and Systems Magazine, pp. 6-27 (2015)
- (153) X. Qu, H. Han, S. Wong, C. K. Tse, W. Chen: "Hybrid IPT Topologies With Constant Current or Constant Voltage Output for Battery Charging Applications", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6329-6337 (2015)
- (154) S. Y. Choi, S. Y. Jeong, B. W. Gu, G. C. Lim, C. T. Rim: "Ultraslim S-Type Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6456-6468 (2015)
- (155) Y. H. Sohn, B. H. Choi, E. S. Lee, G. C. Lim, G. Cho, C. T. Rim: "General Unified Analyses of Two-Capacitor Inductive Power Transfer Systems: Equivalence of Current-Source SS and SP Compensations", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6030-6045 (2015)
- (156) C. Zheng, H. Matsumoto, J. Lai, L. Zhang: "Design Considerations to Reduce Gap Variation and Misalignment Effects for the Inductive Power Transfer System", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6108-6119 (2015)
- (157) B. X. Nguyen, D. Mahinda, G. H. B. Foo, P. Wang, A. Ong, U. K. Madawala, T. Duy Nguyen: "An Efficiency Optimization Scheme for Bidirectional Inductive Power Transfer Systems", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 11, pp. 6310-6319 (2015)
- (158) L. J. Chen, J. T. Boys, G. A. Covic: "Power Management for Multiple-Pickup IPT Systems in Materials Handling Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 163-176 (2015)
- (159) S. Weearsinghe, D. J. Thrimawithana, U. K. Madawala: "Modeling Bidirectional Contactless Grid Interfaces With a Soft DC-Link", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 30, No. 7, pp. 3528-3541 (2015)
- (160) Z. U. Zahid, Z. M. Dalala, C. Zheng, R. Chen, W. E. Faraci, J. Lai, G. Ili: "Modeling and Control of Series-Series Compensated Inductive Power Transfer System", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 30, No. 1, pp. 111-123 (2015)
- (161) R. Bosshard, J. W. Kolar, J. Muhlethaler, I. Stevanovic, B. Wunsch, F. Canales: "Modeling and eta-alpha-Pareto Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 50-64 (2015)
- (162) H. Miura, S. Arai, Fumihito Sato, H. Matsuki, T. Sato: "A Synchronous Rectification Using a Digital PLL Technique for Contactless Power Supplies", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 41, No. 10, pp. 3997-3999 (2015)
- (163) Y. Hayashi, H. Toyoda, T. Ise, A. Matsumoto: "Contactless DC Connector Based on GaN LLC Converter for Next-Generation Data Centers", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 51, No. 4, pp. 3244-3253 (2015)
- (164) J. Hirai, T. Kim, A. Kawamura: "Practical Study on Wireless Transmission of Power and Information for Autonomous Decentralized Manufacturing System", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 46, No. 2, pp. 349-359 (1999)
- (165) M. Pinuela, D. C. Yates, S. Lucyszyn, P. D. Mitcheson: "Maximizing DC-to-Load Efficiency for Inductive Power Transfer", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 28, No. 5, pp. 2437-2447 (2013)
- (166) A. Shimamoto, H. Sakamoto, K. Harada: "Soft switching in Contactless Power Supply Equipments", Technical Report of IEICE, No. PE96-9, pp. 61-68 (1996)
- (167) H. Abe, H. Sakamoto, K. Harada: "Constant-current Charge of the Non-contact Load Dispatching", Technical Report of IEICE, No. EE99-41, pp. 37-44 (1999)
- (168) B. Schumuelling, S. G. Cimen, T. Vossnagen, F. Turki: "Layout and Operation of a Non-Contact Charging System for Electric Vehicles", 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, No. LS4d.4, pp. 1-7 (2012)
- (169) T. Imura, H. Okabe, Y. Hori: "Basic Experimental Study on Helical Antennas of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles by using Magnetic Resonant Coupling", Vehicle Power and Propulsion Conference 2009 (VPPC), pp. 936-940 (2009)
- (170) 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)
- (171) N. Y. Kim, K. Y. Kim, Y. Ryu, J. choi, D. Kim, C. Yoon, et. Al.: "Automated Adaptive Frequency Tracking System for Efficient Mid-range Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", 43rd European Microwave Conference 2012, pp. 221-224 (2012)
- (172) M. Eghtesadi: "Inductive power transfer to an electric vehicle-analytical model", 40th IEEE Conference in Vehicular Technology, pp. 100-104 (1990)
- (173) H. Sakamoto, K. Harada: "A Novel Converter for Non-Contact Charging with Electromagnetic Coupling", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 29, No. 6, pp. 3228-3231 (1993)
- (174) H. Sakamoto, K. Harada: "A Novel High Power Converter for Non-contact Charging with Magnetic Coupling", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 30, No. 6, pp. 4755-4757 (1994)
- (175) A. W. Green, J. T. Boys: "10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control", International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, pp. 694-699 (1994)
- (176) H. Sakamoto, K. Harada, K. Yamasaki: "A Novel High Power Converter for Non-contact Charging with Magnetic Coupling", International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, pp. 461-464 (1995)
- (177) G. A. J. Elliott, J. T. Boys, A. W. Green: "Magnetically coupled systems for power transfer to electric vehicles", International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, Vol. 2, pp. 797-801 (1995)
- (178) J. G. Bolger, F. A. Kirsten, L. S. Ng: "Inductive Power Coupling for an Electric Highway System", IEEE 28th Conference in Vehicular Technology Conference, Vol. 28, pp. 137-144 (1978)
- (179) J. G. Bolger, L. S. Ng, D. B. turner, R. I. Wallace: "Testing a Prototype Inductive Power Coupling For an Electric Highway System", IEEE 29th Conference in Vehicular Technology Conference, Vol. 29, pp. 48-56 (1979)
- (180) A. P. Hu, H. L. Li: "A new high frequency current generation method for inductive power transfer applications", 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference 2006, pp. 18-22 (2006)
- (181) Y. Su, C. Tang, S. Wu, U. Sun: "Research of LCL Resonant Inverter in Wireless Power Transfer System", International Conference on Power System Technology 2006, pp. 1-6 (2006)
- (182) U. K. Madawala, D. J. Thrimawithana: "Current sourced bi-directional inductive power transfer system", Power Electronics IET, Vol. 4, No. 4, pp.

471-480 (2013)

- (183) S. Ahn, H. H. Park, C. Choi, J. Kim, E. Song, H. B. Park, et. Al.: "Reduction of Electromagnetic Field (EMF) of Wireless Power Transfer System using Quadruple Coil for Laptop Applications", IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, No. THU-C-4, pp. 65-68 (2012)
- (184) J. Kim, J. Kim, S. Kong, H. Kim, I. Suh, N. P. Suh, et. Al.: "Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System", Proceedings of the IEEE, Vol. 101, No. 6, pp. 1332-1342 (2013)
- (185) I. Mayordomo, T. Drager, P. Spies, J. Bernhard, A. Pflaum: "An Overview of Technical Challenges and Advances of Inductive Wireless Power Transmission", Proceedings of the IEEE, Vol. 101, No. 6, pp. 1302-1311 (2013)
- (186) F. Musavi, W. Eberle: "Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging", Power Electronics IET, Vol. 7, No. 1, pp. 60-66 (2014)
- (187) J. M. Miller, A. Daga: "Elements of Wireless Power Transfer Essential to High Power Charging of Heavy Duty Vehicles", IEEE Trans. On Transportation Electrification, Vol. 1, No. 1, pp. 26-39 (2015)
- (188) 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)
- (189) 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)
- (190) K. W. Klontz, D. M. Divan, D. W. Novotny, R. D. Lorenz: "Contactless Power Delivery System for Mining Applications", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 31, No. 1, pp. 27-35 (1995)
- (191) A. Esser: "Contactless charging and communication for electric vehicles", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 1, No. 6, pp. 4-11 (1995)
- (192) A. Kawamura, K. Ishioka, J. Hirai: "Wireless Transmission of Power and Information Through One High-Frequency Resonant AC Link Inverter for Robot Manipulator Applications", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 32, No. 3, pp. 503-508 (1996)
- (193) J. M. Barnard, J. A. Ferreira, J. D. Wyk: "Sliding Transformers for Linear Contactless Power Delivery", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 44, No. 6, pp. 774-779 (1997)
- (194) D. A. G. Pedder, A. D. Brown, J. A. Skinner: "A Contactless Electrical Energy Transmission System", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 46, No. 1, pp. 23-30 (1999)
- (195) S. Adachi, F. Sato, S. Kikuchi, H. Matsuki: "Consideration of Contactless Power Station with Selective Excitation to Moving Robot", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 3583-3585 (1999)
- (196) F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, C. Mi: "A High Efficiency 3.3 kW Loosely-Coupled Wireless Power Transfer System Without Magnetic Material", IEEE Energy Conversion Congress & Expo 2015, pp. 2282-2287 (2015)
- (197) C. E. Zell, J. G. Bolger, "Development of an engineering prototype of a roadway powered electric transit vehicle system: A public/private sector program", 32nd IEEE Vehicular Technology Conference 1982, Vol. 32, pp. 435-438 (1982)
- (198) 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)
- (199) M. Sato, G. Giuseppe, T. Imura, H. Fujimoto: "Study on High Efficiency and High Response of Regeneration for Wireless In-wheel Motor", IEEE Trans. D, Vol. 137, No. 1, pp. 36-43 (2016)
- (200) D. Gunji, T. Imura, H. Fujimoto: "Novel Transmitting Power Control Method without Signal Communication for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", IEEE Trans. D, Vol. 136, No. 3, pp. 222-231 (2016)

日下佳祐



(正員) 1989年2月3日生まれ。2013年3月、長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月、同大学大学院博士後期課程エネルギー・環境工学専攻入学。2015年12月から2016年6月までSwiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL)にTraineeとして所属。同年3月、長岡技術科学大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。2016年4月より長岡技術科学大学産学官連携研究員。現在に至る。主に非接触給電システム、太陽光発電向け電力変換回路の研究に従事。IEEE member, 自動車技術会会員。

伊東淳一



(上級会員) 1972年1月6日生まれ。1996年3月、長岡技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月、富士電機(株)入社。2004年4月、長岡技術科学大学電気系准教授。現在に至る。主に電力変換回路、電動機制御の研究に従事。博士(工学)(長岡技術科学大学)。2007年第63回電気学術振興賞進歩賞受賞。2010年Takahashi Isao Award (IPEC Sapporo), 第58回電気科学技術奨励賞, 2012年インテリジェントコスモス奨励賞, 2014年, 2016年電気学会産業応用部門論文賞, 受賞。IEEE Senior member, 自動車技術会会員。