ついに突破口が見つかったワイヤレス給電の新方式 -磁界共振理論の誤りを微修正するだけ-

牛嶋昌和 WQC株式会社

あらまし 磁界共振方式の理論式には誤りがあり、それを修正してみた結果、抜群のロバスト性の改善と効率の 改善が得られた.今までなぜこの解決法が見つからなかったのかの疑問に応える.

1. 実験回路



1.1. ワイヤレス給電の課題

ワイヤレス給電の最大の課題は、送電コイルと受電 コイルとの距離や位置関係が変化した場合にも高い効 率で送受電できるようにすることです.

位置の自由度のことをロバスト性といい,位置の自 由度が高いことをロバスト性が高いといいます.

一般にワイヤレス給電では効率をよくすればロバス ト性が低くなり、ロバスト性を高くしようとすれば効 率が悪くなり、必ずどちらかが犠牲になります.効率 を常に高く保ちながらロバスト性を高く確保すること は容易なことではないとされてきました.

本報告では2次側の共振コンデンサから拾った共振 電流位相を1次側に帰還することによってこの問題を 解決しました.

共振周波数の変化を自動追跡することによって、ロ バスト性の高さと高効率(高力率)とを兼ね備えたワイ ヤレス給電システムができあがります.

このような方式を電流共振回路といいます.以下順 を追って説明していきましょう.

1.2. 自動的に共振周波数を追跡する

ロバスト性を低くする最大の原因は、コイル間の距離や位置関係が変化すると共振周波数が変化するため です.この共振周波数の変化を自動追跡することがで きればロバスト性を高くすることができます.

回路図を図1に示します.このワイヤレス給電回路は概ね250Wぐらいまで使える設計をしてあります.

本回路ではどのようにして自動追跡しているかというと、2次側の共振コンデンサ C401, C402 に流れる 電流位相を1次側に帰還していますがこれが鍵です.

実際には共振コンデンサ C401, C402 には大きな共振電流が流れるため,並列に小さな容量 C403 を取り付けてその電流位相を検出して帰還します. C 点と D 点に流れる電流の位相は等しくなります.

電流の位相検出を簡単にするために、今回はツェナ ー・ダイオード DZ401 を使いました.この方法は電流 位相が矩形波になって検出できる点が便利です.この 部分の位相は検出抵抗と OP アンプなどで増幅して検 出することもできます.その場合は充分にスルーレー トの高い高速 OP アンプを使用してください.

ツェナー・ダイオード DZ401 の電圧波形はトランジ スタ Q401 でバッファして電流増幅してから赤外線 LED D401 を駆動しています.

1.3. 周波数追跡の原理とZVS 動作

本報告の回路は電流共振回路といいます。 図 2 を見ながら各部の動作を確認していきましょう. Q301, Q302 のハーフ・ブリッジ回路中点の A 点の

CONFIDENTIAL toward NON-PARTIES until PUBLISHED

電圧を見てください. ここから説明が始まります。

2 次側が共振周波数で共振している場合, B 点に流 れる電流は正弦波に近くなり, A 点の電圧位相よりも 少しだけ遅れた電流位相になります.

これを ZVS 動作と言います。EMC も減るし、部品の発熱も減るという理想の駆動状態です.



図2 電流共振回路の動作

なぜそうなるかは続いて説明を見てください.

2 次側の共振コンデンサ C401, C402 に流れる電流 の位相 C を見てみます. 共振している際にはこの電流 位相は A 点の電圧位相と同じになります.

補助コンデンサ C403 に流れる電流位相 D も C と同 じ位相になります.

そうすると DZ401 の電圧波形は矩形波になり, D の 電流位相と等しくなります.

D401 が赤外線 LED でその光出力は矩形波になりま す.またその位相は共振コンデンサ C401, C402 に流 れる電流の位相 C と等しくなることがわかると思いま す.実際にはこの過程で少しずつ位相遅れが生じます が,回路を設計する際にはその位相遅れができるだけ 少なくなるように注意します。

次にこの光出力が受光回路に入光します. その際に 受光回路による遅延が起きないように PIN フォトダイ オードを用いた受光回路にするなど, じゅうぶんに注 意してください.

この受光回路の出力が E 点の電圧です. その E 点の 電圧によってシュミットトリガが駆動され, その電圧 がハイ・サイド・スイッチ U202 の入力に入り, Q301, Q302 のハーフ・ブリッジを駆動します.

このようにして帰還回路が動作します.

このように、電流共振回路の動作というものは非常 にシンプルなものです.

それではなぜ B 点の電流即ち 1 次側コイルに流れる 電流位相が少しだけスイッチング電圧よりも遅れてい るのでしょうか.これが ZVS (ゼロボルトスイッチン グ) 条件というものです.

C302, C303 の共振コンデンサの C 点の電流位相は B 点電流位相よりも少しだけ早いのです. これが電流共振回路による自動 ZVS 動作です.

なぜそうなるのかは位相解析を行わないと理解でき ないので後述します.

2. 共振原理の見直しが必要

2.1. 磁界共振は音叉の共鳴とは違う

ワイヤレス給電の磁界共振(磁界共鳴とも言われる) は2006年の有名な MIT Experiments(写真 3)と言われる ものに端を発しています.



写真1 有名なMIT Experiments と呼ばれるもの. 最大2mもの 無線伝送ができることを実証した.

このときにマリン・ソーリャチッチ(Marin Soljačić) が最大 2mもの電力伝送を実現して,その成果が世界 に披露されたときから一挙に話題に上るようになりま した.(写真 1)その際にこの実験では 1 次側と 2 次側 とに共振コイルが置かれおり,そして二つのコイル間 に共鳴が起きることによりエネルギの伝導路(共鳴場 エバネセントテールどうしの結合)が形成されている と説明されています.

磁界共振はその原理が音叉の共鳴に例えられると信 じられ.(皆が信じ,)音叉の共鳴という説明が直感的 にも納得しやすかったせいもあるかと思うのですが, そのために磁界共振には1次側,2次側の両方に共振 器が必須であるというイメージが定着してしまいまし た.

2.2. 実は二つの共振器は必須ではない

ところが磁界共振というものは必ずしも共振回路が 1次側と2次側との双方に必須だというわけではあり ません.

以前から知られているコイル間結合の現象に調相結 合(CHOSO Coupling, Magnetic flux Phase Synchronous Coupling)というものがあります.これは2次側のコ イルに強い共振を起こさせることによって,コイル間 の結合が高まるというものです(1)(2).この場合は1 次側の共振が必ずしも必須ではありません.

CHOSO Coupling では、2次側を高いQ値で強く共振させることによって、高効率な中距離伝送が実現できることがわかってきました。そしてこれが、新しい磁界共振の方式の一つとして認識されるようになりつつあります。

3. 調相結合とは何か

CHOSO Coupling (Magnetic flux Phase Synchronous Coupling)は今まで Resonance Coupling と呼ばれながら 曖昧な定義しか存在しなかったその Magnetic Resonanceの原理の本質部分にあたると考えられます.

3.1. コイル間の結合を強くする調相結合

調相結合では共振回路が二次側だけでもいいので音 叉の共鳴の原理では説明できません.

また,結合が強くなるといっても結合係数 k が高く なるわけではありません.

3.2. コイル間の結合に調相結合を利用する

調相結合という言葉や現象があまり知られていない ようです. 解説すると次のようになります.



図3 調相結合の基本構成

図 3(a)(b)に調相結合の基本回路図を示します.調相 結合は非常に簡単な構成であり、疎結合になった1次 コイルと2次コイルとがあり、その2次側に共振コン デンサを接続しただけです.そして、2次側の共振周 波数で1次側から駆動してあげると調相結合が起きま す.

負荷に対して並列にコンデンサを配置した図 3(a)と 負荷に対して直列にコンデンサを配置した図 3(b)があ ります.このどちらでも調相結合が起きます.

調相結合の実用化は早くから行われており,1995年 頃から図 3(a)のタイプが液晶のバックライトに,図 3(b)のタイプが構内搬送機の給電に利用され始めてい ます(3).

3.3. 磁束の位相が揃うと調相結合が起きる

調相結合の調相とはコイルとコイルとの間の磁気位 相が揃うという意味です.

図4に調相結合が起きるときの磁束の状態を示しま す.

この場合,1次側のコイルだけが駆動され,2次側の コイルには共振コンデンサが接続されています.

後述しますが、2 次側のコイルとコンデンサとが特定の条件で共振する周波数において、二つのコイルの 電流の位相が揃う現象が起きます.そうすると調相結 合が起きます.

調相結合が起きると、1次側のコイルと2次側のコ イルとの両方を通り抜ける(両方のコイルに鎖交する) 磁束が生じます.この磁束のことを主磁束と言います. 主磁束はコイル間の電力伝送を媒介する重要な磁束で す.



L1とL2とが同じ電流位相になり, 主磁束が形成される 図4 調相結合が起きる原理1

この主磁束の形成こそがワイヤレス給電にとっても っとも重要なことになります.

では調相結合が起きる原理を順を追って見ていきま しょう.

複数のコイルがあり、それらのコイルを流れる電流 の位相が皆揃っている場合を考えます.図 5(a)は二つ のコイルの間が線でつながれている場合です.この場 合は磁束の位相も揃うので図 5(a)のように各コイルを 中心にして同位相の(同期したといってもよい)磁束 が発生します.

しかし実際には同じ位相の磁束は引き合って図 5(b) のようにコイル間どうしに磁束の結合が起きます.こ れが最も基本的な調相結合です.図 5(b)はコイルどう しが直列に線でつながっているのですから電流の位相 が揃うのはあたりまえですね.そして電流と磁束とは 比例しますから電流の位相が揃うと磁束の位相も揃い ます.これもあたりまえです.



(a) 各コイルの周辺に同位相の磁束が発生しようとする



(b) 磁束は(a)のようにはならず、各コイルの磁束の一部がつながる 図5 調相結合が起きる原理2

なんだ,そんなの昔からあったじゃないかといえば そのとおりで,電気工学などの教科書にも載っていま す.それを調相結合と呼んでいなかっただけです.



(c) L1とL2とが同じ位相で駆動されれば主磁束が形成される図5 調相結合が起きる原理2

では二つのコイルが図 5(c)のように別々に駆動され るような場合はどうでしょうか.この場合であっても, コイルを流れる電流の位相が揃ってさえいれば調相結 合が起きます.

つまり調相結合というのは、磁束の位相が揃ったコ イル同士に主磁束の形成が起きる現象のことをいうの です.そしてこの主磁束を介して電力伝送が行われま す.

3.4. 調相結合の性質を分析してみよう

ところで,結合係数の低い磁気漏れトランスとかワ イヤレス給電の話になると調相結合が興味深い現象と して観察されるようになります.

先ほどの図 3(a)(b)の回路で 2次側の共振回路に共振 が起きている様子を図 6(a)のように 1 次側からインピ ーダンスアナライザーで観察してみます.



図6 (a)測定ターゲット図6(a)のタイプでV1/I1を測定



図6(b)送電側の電圧源(V1)から見たインピーダンス(V1/I1)

すると図 6(b)のようなインピーダンス特性が見られ ます. 横軸が周波数で縦軸がインピーダンスです. 図 6(b)を見ると, インピーダンスが極大になる周波数と インピーダンスが極小になる周波数があることがわか ります.

このインピーダンスが極小になる周波数は直列共振 周波数とか単に共振周波数とか呼ばれます.この周波 数で調相結合が起きます.

一方,インピーダンスが極大になる周波数がありま すが,こちらは並列共振周波数とか反共振周波数とか 呼ばれます.こちらの周波数では調相結合が起きません.

本報告のワイヤレス給電においては調相結合が起き る方の共振である直列共振周波数(共振周波数)を使用 します.



(b)送電コイルを共振周波数で駆動したときの結合磁束の様子

図7 調相結合が起きる共振周波数と起きない共振周波数

この周波数では図 7(b)のように多くの主磁束が形成 されています.これは1次コイルと2次コイルとの間 の電力伝送がうまくいくことを意味します.

3.5. 従来の磁界共振では並列共振周波数を使っ ていたというのが間違いの原因

一方,並列共振周波数(反共振周波数)では図 7(a)の ように磁束の位相が 90° ずれていて主磁束が形成さ れません.これでは1次コイルと2次コイルとがうま く結合することができなくなってしまいます.

これまでに数多く発表されている一般的な磁界共振 とは,実は並列共振周波数(反共振周波数)を使ったタ イプの磁界共振でした.

このタイプの磁界共振の特徴として、コイル間どう しを近づけて結合係数が高くなると、コイル間の磁束 の位相ずれが 90°に近づくことになります.また、2 次側の共振のQ値を高くしてもコイル間の磁束の位相 ずれが 90°に近づきます.



図8 反共振周波数ではエネルギーの伝達がうまくいかない

その結果,主磁束が形成されにくくなるので,コイ ル間の距離を近づければ近づけるほど,また共振のQ 値を高くすればするほど,並列共振の中心周波数では 電力伝送が阻害されて共振のピーク部分が凹み,その 結果が双峰特性となって表れるわけです(図8,図9).



図9 従来の磁界共振に現れる双峰特性の様子

この双峰特性のどちらのピークも見かけ上の共振で あって,次に述べる並列共振周波数と直列共振周波数 のどちらの共振でもありません.

4. 反(並列)共振周波数と直列振周波数を分析

4.1. どうして並列共振周波数と直列共振周波数に 分かれるのか



(a) 一つ目の共振周波数(並列)が現れるLCの組み合わせ(破線内)



(b) 二つ目の共振周波数(直列)が現れるLCの組み合わせ(破線内)

図10 どうして並列共振周波数と直列共振周波数が現れるのか

図 10(a) (b)に 2 次側に共振コンデンサ C2 を接続し た場合のワイヤレス給電の等価回路を示します. これ は普通のトランスの三端子等価回路であって,結合係 数が小さいだけです. ワイヤレス給電の等価回路は今 までのトランスの等価回路と異なるところはありませ ん.

図 10(a) (b)でなぜ二つの共振周波数が現れるのかを 考えてみましょう.

まず, 第一の共振周波数, 並列共振周波数は図 10 の(a)のように共振コンデンサ C2 と(Le2+M)との共振 です. ここで, (Le2+M)とは 2 次側コイルのインダク タンス L2 のことですから, C2 と L2 とで共振周波数 が決まります. すると, 並列共振周波数 f_p の計算式は 次のよく目にする式になります.

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$$
 ...(1)

次に第二の共振周波数,直列共振周波数は,図 10 の(b)のように1次側を短絡した場合の1次側Le1とM とが並列合成されて,これに直列に2次側のLe2が直 列合成されたインダクタンスLscと共振コンデンサC2 との共振周波数になります.

Lsc を計算してみましょう.図 10 の(b)の等価回路に したがって Le1=Le2=Le としてインダクタンスを並 列・直列合成します.

$$L_{sc} = \frac{1}{\frac{1}{L_e} + \frac{1}{M}} + L_e \qquad ...(2)$$

となります.

これを L2 の式で表してみましょう. 結合係数を k として, Le=(1 - k)L2, M= kL2 ですから, 式(2)を 代入して, 次のようになります.

$$L_{sc} = \frac{1}{\frac{1}{(1-k)L_2} + \frac{1}{kL_2}} + (1-k)L_2$$
$$= \frac{1}{\frac{kL_2 + (1-k)L_2}{kL_2^2 - k^2L_2^2}} + (1-k)L_2$$
$$\frac{kL_2^2 - k^2L_2^2}{kL_2 + (1-k)L_2} + (1-k)L_2 = \frac{kL_2^2 - k^2L_2^2}{L_2} + (1-k)L_2$$

$$= kL_2 - k^2L_2 + (1-k)L_2 = kL_2 - k^2L_2 + L_2 - kL_2$$

$$= L_2 - k^2 L_2 = (1 - k^2) L_2$$
$$L_{sc} = (1 - k^2) L_2 \qquad \dots (3)$$

この Lsc と共振コンデンサ C2 とが共振するので直 列共振周波数 f_s の式は,次のようになります.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1-k^2)L_2C_2}} \qquad \dots (4)$$

ここで,式(3)のLsc は短絡インダクタンスと呼ばれ, その値を直接測定することも可能です.測定する際に はコイル間の距離を固定し,一次側のコイルを短絡し て二次側からインダクタンスを測ります(6). そのよう にして測ったインダクタンス値が短絡インダクタンス Lsc で, 直列共振周波数 f_s を決めるインダクタンス値 になります.

このように、1次側から見た2次側の共振には並列 共振周波数と直列共振周波数という二つの共振周波数 があることがわかります.

以上は図 3(a)について共振周波数が二つ現れる理由 を述べましたが、図 3(b)についても式(1),式(4)は同じ になりますのでやはり共振周波数は二つ現れます.

そして式(4)によって示されるとおり,直列共振周波数は結合係数が大きくなるにしたがい共振周波数が高くなります.

このことは、調相結合を利用して電力伝送を行う場 合には結合係数の変化、すなわちコイル間の距離や位 置関係の変化にしたがって変化する直列共振周波数を 追従する必要があります.

4.2. 主磁束は電力変換の要

並列共振周波数はワイヤレス給電においては役に立 たない周波数です.別名反共振周波数とも言われる言 葉のイメージのとおり、二つのコイルが共振して結合 することにおいては図 7(a)のように、1 次側 2 次側か らそれぞれ 90°位相のずれた磁束が発生して主磁束 の形成を阻害する働きをしています.

これに対して直列共振周波数では調相結合によって 図7(b)のように1次側の磁束と2次側の磁束とが結合 して主磁束が形成されます.主磁束は電力伝送の要と なる磁束であり,この主磁束を介して1次側と2次側 とが電力のやりとりをします.つまり,主磁束ができ あがれば給電ができます.

5. 正しい磁界共振の周波数設定

5.1. 従来の磁界共振は設定が間違っていた

L2 本報告のワイヤレス給電回路の製作においては調相 結合が起きる方の共振周波数図 7(b)を積極的に利用す るようにしています.

従来の磁界共振とはここが大きな違いで,共振周波数 を設定する LC パラメータが少しだけ違います.その 少しの違いが大きな違いを生みます.

5.2. 調相結合では共振周波数が変化する

ここで問題が起きます. 共振周波数(直列共振周波数)は式4で示されたとおり,結合係数kによって変化しますから. コイル間の距離が変化すると共振周波数も変化してしまうことになります.

そこで、共振周波数の変化にしたがって動作周波数 が追従していかなければなりません.次の課題はその 機構をどうするかでありそれが重要な鍵になります.

5.3. 共振周波数の正しい設定方法

今までの磁界共振を正しく設定しなおす場合ですが,

以下のように設定します. 今までの磁界共振では1次 側と2次側との両方に共振回路があり,1次側のL1と C1の積と,2次側のL2とC2の積を同じ値に設定して いました. これが間違いです. 正しくは以下のように します.

5.4.2 次側の L2・C2 の積を 1 次側 L1・C1 の積の 1/√1-k² 倍に設定

修正された新しい磁界共振では図 11 のように 2 次側 の L2・C2 の積を 1 次側 L1・C1 の積の $1/\sqrt{1-k^2}$ 倍に 設定します.



つまり, L2, C2積をL1, C1積の 1/√1-k² 倍にする. 従来の磁界共振とは異なる設定.

図11コイル間距離が固定され、一定の周波数で駆動する場合の設定

たったこれだけの設定です.これで今までの磁界共 振の効率が大幅に改善されます.駆動周波数が固定で, コイル間の距離が固定された場合のワイヤレス給電で はこれで十分でしょう.

しかし、コイル間の距離が変わる場合は結合係数の 変化にしたがって駆動周波数を変えなければならない という課題が出てきます.

その場合, 1次側の共振回路がない方が周波数制御 をする場合には有利です.1次側の共振回路は必須と いうものではありません.

それでは,結合係数が変化した場合にどのようにし て最適な駆動周波数を追跡したらよいのかその方法を 考えてみましょう.

図 12 に回路シミュレーションに使われた等価回路 を示します. 結合係数は 0.2 から 0.8 までとし, 共振 周波数が 23kHz から 50kHz まで変化するようすを見ま す.

着眼する位相は1次側の送電コイルの電流位相,図 1でいえばA点電圧位相に対するB点電流位相,C点 電流位相,そして送電コイルと受電コイルの電圧比(ゲ イン)の周波数解析です.

5.5. 新方式は回路シミュレーションでも立証が可能

最適な駆動周波数を追跡するために,手始めに調相

結合の際の各コイルに流れる電流や電圧について回路 シミュレーションをしてみます. 使う解析は周波数解 析です.



図12 シミュレーション(周波数解析)の等価回路

5.6. 共振周波数は大きく変化する

結果は図 13(a)(b)(c)のようになります.

図 13(a)は横軸が周波数になっていて,縦軸に1次側 のコイルのスイッチング位相に対する電流位相の位相 特性が示されています.並列共振周波数と直列共振周 波数のそれぞれの周波数付近で位相特性が Odegree を 横切る様子が見られます.電流の位相特性が Odegree であるということは抵抗性で駆動しているということ であり,誘導性のコイルを駆動していながらその誘導 性が2次側の共振によって打ち消されていて,ちょう ど抵抗性になっているわけであり,駆動の力率がほぼ 1 だということです.

この周波数で駆動すれば1次コイルには無効電流が 流れず,発熱が少なくなることを意味します.



図13 シミュレーション(周波数解析)の出力結果

5.7. ZVS 動作を実現する

図 13(b)は 2 次 側 の 共振 コンデンサ C401, C402 に 流れる 電 流 の 位 相 で す . こ の 場 合 も 1 次 側 の コイル の スイッチング 位 相 に 対 す る 位 相 で す .

ちょうど直列共振周波数のところで電流 の位相特性が Odegree を横切ります.これ を上手に使えば直列共振周波数の検出がで きることになります.都合が良いことに, 図 13(a)(b)を比べると,電流の位相特性が Odegree を横切る周波数が少し違っており, 図 13(b)の Odegree を横切る周波数は図 13(a)の電流遅延,すなわち誘導性の周波数 です.これはどういうことを意味するかと いえば, ZVS(ゼロボルトスイッチング)が できるということです.さらに嬉しいこと に力率も1に近いのです.こんな一石二鳥 の方法はなかなかありません.

5.8. 伝達関数のピーク

図 13(c)は周波数と伝達関数(伝達ゲイン)との関係です.

図 13(b) (c)を比べると、電流の位相特性が Odegree を横切る周波数は伝達ゲインの ピークと一致しています.2 次側の共振コ ンデンサに流れる電流の位相は伝達ゲイン のピークも検出できるわけです.これは一 石三鳥というさらに嬉しい結果が得られま した.結局 2 次側の共振コンデンサ C401, C402 に流れる電流の位相を一次側に帰還 してあげるという非常に簡単な方法で共振 周波数の自動追跡が実現できてしまうこと になります.

ここで,並列共振周波数の式(1)のほうの 伝達関数を見てみると,2 次側出力の電圧 の上昇に寄与していません.このことから ワイヤレス給電には利用できない周波数だ ったということがわかります.それどころ か,並列共振周波数は1次側からの電力伝 送を阻害して双峰特性にする原因になって います.

今までは 2 次側 LC の共振の式を式(1)に 合わせることが主流でしたが, 今後は 2 次 側 LC の共振の式は式(4)に一新することに しましょう.

6. まとめ

以上,本報告では従来の磁界共振の式を 修正することにより高効率の電力伝送がで きることを解明して実証しました.

また新たな共振の式にもとづく共振周波

数の変化という課題に関しては電流共振回路(位相の帰還)という着眼によってこれを 解決し、ロバスト性と効率のよさの双方を 両立させる回路の動作を確認しました. また、従来の磁界共振に生じる双峰特性 に関しては独自の見解により新たな解釈を 加えることにしました.

この新たな磁界共振の概念が普及するこ とにより、ワイヤレス給電の磁界共振方式 普及の阻害要因が取り除かれることによっ て、ワイヤレス給電の実用化が大幅に進む ことにつながれば幸いです.

文 献

- (1) 古川靖夫,圓道祐樹, "ワイヤレス給電 装置,ワイヤレス受電装置およびワイ ヤレス給電システム,ワイヤレス給電 方法,"(株)アドバンテスト,日本国 特許庁,特開 2011-211895, pp.10,日本, 2011.
- (2)牛嶋昌和,湯浅肇,荻野剛,"電磁誘導 と磁界共振の中間的な構成による電力 伝送のシミュレーションと実験,信学技 報,電子情報通信学会,WPT2014-89, 2015.
- (3)山本建三,北吉晴芳,川松康夫,入江寿一,"非接触電力分配システム,"(株) 椿本チエイン,日本国特許庁,特開平 08-308151,pp.8,日本,1996.
- (4) 日本工業標準 C 6435:1989,pp.7-8,日本工業標準調査会, 1989.
- (5) 平山博,大附辰夫,オーム社,"交流回路,"電気回路論,Vol.3,pp.94-96,(社) 電気学会,東京,2008.
- (6) 日本工業標準 C 5602:1986,pp.34,日本工業標準調査会, 1986.



図13 シミュレーション(周波数解析)の出力結果

10

WQC 技報 WQC Technical Report



図1 電流共振方式を使ったワイヤレス給電回路の回路図