

明 細 書

発明の名称：

無線電力伝送装置、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法、及び、無線電力伝送装置の製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、無線電力伝送装置、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法、及び、無線電力伝送装置の製造方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、ノート型ＰＣ、タブレット型ＰＣ、デジタルカメラ、携帯電話、携帯ゲーム機、イヤホン型音楽プレイヤー、無線式ヘッドセット、補聴器、レコーダーなど人が携帯しながら使用できる携帯型の電子機器が急速に普及してきている。そして、これらの携帯型の電子機器の多くには充電電池が搭載されており、定期的な充電が必要とされる。この電子機器の充電電池への充電作業を簡易にするために、給電装置と電子機器に搭載された受電装置との間で無線による電力伝送を利用した給電技術（磁界を変化させて電力伝送を行う無線電力伝送技術）により、充電電池を充電する機器が増えつつある。

[0003] 例えば、無線電力伝送技術としては、コイル間の電磁誘導を利用して電力伝送を行う技術や（例えば、特許文献１参照）、給電装置及び受電装置が備える共振器（コイル）間の共振現象（磁界共鳴状態）を利用して磁場を結合させることにより電力伝送を行う技術が挙げられる（例えば、特許文献２参照）。

[0004] また、充電電池（例えば、リチウムイオン二次電池など）を充電する方式に関しては、定電流定電圧充電方式が知られている。そして、上記無線による電力伝送を行う無線電力伝送装置によって、リチウムイオン二次電池を定電流定電圧充電方式によって充電する場合、定電流充電から定電圧充電に移行したときに、供給される電流値が減衰し、充電電池を含めた被給電機器（充電

池、安定回路、充電回路などが含まれる)の負荷インピーダンスの値が上がることになる。

[0005] そうすると、被給電機器を含めた無線電力伝送装置全体の入力インピーダンスも上がることになるが、この被給電機器の負荷インピーダンスの値の上昇に応じた入力インピーダンスの変化量を大きくすることができれば、充電の際に消費される電力量を低減することができる。即ち、充電の際に消費される電力量を低減するために、被給電機器の負荷インピーダンスの単位変化量に対する無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量である負荷変動応答性を調整可能とすることが求められる。

[0006] そして、負荷変動応答性を調整可能とするために、別個にインピーダンス整合器を設けることが考えられる。

先行技術文献

特許文献

[0007] 特許文献1：特許第4 6 2 4 7 6 8 号公報

特許文献2：特開2 0 1 0 - 2 3 9 7 6 9 号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] しかしながら、別個にインピーダンス整合器を設けることは、携帯性・コンパクト化・低コスト化が求められる携帯電子機器においては、部品点数が多くなってしまい不都合である。

[0009] 換言すれば、無線電力伝送装置（給電装置及び受電装置）に新たな機器を追加せずに、負荷変動応答性を調整することが望ましい。

[0010] そこで、本発明の目的は、新たな機器を追加せずに、無線電力伝送装置における給電装置及び受電装置に設けられたコイル間における結合係数を調整することにより、負荷変動応答性を調整し、もって、供給される電力量を制御することができる無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法等を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0011] 上記課題を解決するための発明の一つは、給電モジュールから、電力を消費する被給電機器が接続された受電モジュールに対して磁界を変化させて電力を供給する無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、前記給電モジュール、及び、受電モジュールはそれぞれ少なくとも1つのコイルを有し、隣接する前記コイル間における結合係数の値をそれぞれ調整することにより、前記被給電機器の負荷インピーダンスの単位変化量に対する当該無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量である負荷変動応答性を調整することを特徴としている。

[0012] 上記方法によれば、無線電力伝送装置により電力が供給されている被給電機器における負荷インピーダンスが変化した場合、被給電機器の負荷インピーダンスの単位変化量に対する無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量である負荷変動応答性を、給電モジュール、及び、受電モジュールが備えるコイル間における結合係数の値を変えることにより調整することができる。これにより、例えば、上記コイル間における結合係数の値を変えることにより、負荷変動応答性を小さくすれば、被給電機器における負荷インピーダンスの変化に対する、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量を小さくすることができる。逆に、上記コイル間における結合係数の値を変えることにより、負荷変動応答性を高くすれば、被給電機器における負荷インピーダンスの変化に対する、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量を大きくすることができる。

そして、負荷変動応答性を高くすることができれば、被給電機器における負荷インピーダンスの変化に追隨して無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値を変えることができ、その際に供給される電力を低減することができる。一方、負荷変動応答性を小さくすることができれば、被給電機器における負荷インピーダンスが変化したとしても、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値を維持することができ、その際に供給される電力を維持することができる。

更に、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整を、新たな機器を設けずに実現することができる。即ち、無線電力伝送装置の部品点数を増やさずに、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を調整することが可能となる。

[0013] 上記課題を解決するための発明の一つは、少なくとも給電コイル及び給電共振器を備えた給電モジュールから、少なくとも受電共振器及び受電コイルを備え、電力を消費する被給電機器が接続された受電モジュールに対して共振現象によって電力を供給する無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、前記給電コイルと前記給電共振器との間における結合係数 k_{12} 、前記給電共振器と前記受電共振器との間における結合係数 k_{23} 、及び、前記受電共振器と前記受電コイルとの間における結合係数 k_{34} の値の少なくとも 1 つを調整することにより、前記負荷変動応答性を調整することを特徴としている。

[0014] 上記方法によれば、給電モジュールから、受電モジュールに対して共振現象によって電力を供給する無線電力伝送装置に関して、給電コイルと給電共振器との間における結合係数 k_{12} 、給電共振器と受電共振器との間における結合係数 k_{23} 、及び、受電共振器と受電コイルとの間における結合係数 k_{34} の値を調整することによって、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を調整することができる。

[0015] 上記課題を解決するための発明の一つは、上記無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、前記各結合係数 k_{12} 、 k_{23} 、 k_{34} の値は、それぞれ前記給電コイルと前記給電共振器との間の距離、前記給電共振器と前記受電共振器との間の距離、及び、前記受電共振器と前記受電コイルとの間の距離の少なくとも 1 つを変化させることにより調整されることを特徴としている。

[0016] 上記方法によれば、給電コイルと給電共振器との間の距離を変化させることにより、結合係数 k_{12} の値を変化させることができ、給電共振器と受電共振器との間の距離を変化させることにより、結合係数 k_{23} の値を変化させること

ができ、受電共振器と受電コイルとの間の距離を変化させることにより、結合係数 k_{34} の値を変化させることができる。これによれば、給電コイルと給電共振器との間の距離、給電共振器と受電共振器との間の距離、及び、受電共振器と受電コイルとの間の距離を物理的に変化させるという簡易な作業により、それぞれのコイル間の結合係数の値を変えることができる。即ち、給電コイルと給電共振器との間の距離、給電共振器と受電共振器との間の距離、及び、受電共振器と受電コイルとの間の距離を物理的に変化させるという簡易な作業によって、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を調整することができる。

[0017] 上記課題を解決するための発明の一つは、上記無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、前記給電共振器と前記受電共振器との間の距離、及び、前記受電共振器と前記受電コイルとの間の距離を固定した場合、前記負荷変動応答性は、前記給電コイルと前記給電共振器との間の距離を短くするにつれて、前記給電コイルと前記給電共振器との間における前記結合係数 k_{12} の値が大きくなり、前記結合係数 k_{12} の値が大きくなるにつれて、当該無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性が高くなる特性に基づいて調整されることを特徴としている。

[0018] 上記方法によれば、給電共振器と受電共振器との間の距離、及び、受電共振器と受電コイルとの間の距離を固定した場合、給電コイルと給電共振器との間の距離を短くすることにより、給電コイルと給電共振器との間における結合係数 k_{12} の値を大きくし、結合係数 k_{12} の値を大きくすることにより、当該無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を高くすることができる。逆に、給電コイルと給電共振器との間の距離を長くすることにより、給電コイルと給電共振器との間における結合係数 k_{12} の値を小さくし、結合係数 k_{12} の値を小さくすることにより、当該無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を小さくすることができる。

そして、負荷変動応答性を高くすることができれば、被給電機器における

負荷インピーダンスの変化に対する、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量を大きくすることができるため、被給電機器における負荷インピーダンスの変化に追隨して無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値を大きく変えることができ、その際に供給される電力を低減することができる。一方、負荷変動応答性を小さくすることができれば、被給電機器における負荷インピーダンスの変化に対する、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量を小さくすることができるため、被給電機器における負荷インピーダンスが変化したとしても、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値を維持することができ、その際に供給される電力を維持することができる。

[0019] 上記課題を解決するための発明の一つは、上記無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、前記給電コイルと前記給電共振器との間の距離、及び、前記給電共振器と前記受電共振器との間の距離を固定した場合、前記負荷変動応答性は、前記受電共振器と前記受電コイルとの間の距離を短くするにつれて、前記受電共振器と前記受電コイルとの間における前記結合係数 k_{34} の値が大きくなり、前記結合係数 k_{34} の値が大きくなるにつれて、当該無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性が高くなる特性に基づいて調整されることを特徴としている。

[0020] 上記方法によれば、給電コイルと給電共振器との間の距離、及び、給電共振器と受電共振器との間の距離を固定した場合、受電共振器と受電コイルとの間の距離を短くすることにより、受電共振器と受電コイルとの間における結合係数 k_{34} の値を大きくし、結合係数 k_{34} の値を大きくすることにより、当該無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を高くすることができる。逆に、受電共振器と受電コイルとの間の距離を長くすることにより、受電共振器と受電コイルとの間における結合係数 k_{34} の値を小さくし、結合係数 k_{34} の値を小さくすることにより、当該無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を小さくすることができる。

そして、負荷変動応答性を高くすることができれば、被給電機器における負荷インピーダンスの変化に対する、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量を大きくすることができるため、被給電機器における負荷インピーダンスの変化に追隨して無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値を大きく変えることができ、その際に供給される電力を低減することができる。一方、負荷変動応答性を小さくすることができれば、被給電機器における負荷インピーダンスの変化に対する、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量を小さくすることができるため、被給電機器における負荷インピーダンスが変化したとしても、無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値を維持することができ、その際に供給される電力を維持することができる。

[0021] 上記課題を解決するための発明の一つは、上記無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、前記給電モジュールに供給する電力の駆動周波数に対する伝送特性の値が、前記給電モジュール及び受電モジュールにおける共振周波数よりも低い駆動周波数帯域及び前記共振周波数よりも高い駆動周波数帯域にそれぞれピークを有するように設定し、前記給電モジュールに供給する電力の前記駆動周波数は、前記共振周波数よりも低い駆動周波数帯域に現れる伝送特性のピーク値に対応する帯域であることを特徴としている。

[0022] 上記方法によれば、給電モジュールに供給する電力の駆動周波数に対する伝送特性の値が、給電モジュール及び受電モジュールにおける共振周波数よりも低い駆動周波数帯域及び共振周波数よりも高い駆動周波数帯域にそれぞれピークを有するように設定した場合に、給電モジュールに供給する電力の駆動周波数を、共振周波数よりも低い駆動周波数帯域に現れる伝送特性のピーク値に対応する帯域の周波数に設定することにより、比較的高い伝送特性を確保することができる。

また、給電モジュールの外周側に発生する磁界と受電モジュールの外周側に発生する磁界とが打ち消し合うことにより、給電モジュール及び受電モジ

ジュールの外周側に、磁界による影響が低減されて、給電モジュール及び受電モジュールの外周側以外の磁界強度よりも小さな磁界強度を有する磁界空間を形成することができる。これにより、形成した磁界空間に、磁界の影響を受けたくない回路等を格納することで、スペースの有効活用ができ、無線電力伝送装置自体の小型化を図ることが可能になる。

[0023] 上記課題を解決するための発明の一つは、上記無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、前記給電モジュールに供給する電力の駆動周波数に対する伝送特性の値が、前記給電モジュール及び受電モジュールにおける共振周波数よりも低い駆動周波数帯域及び前記共振周波数よりも高い駆動周波数帯域にそれぞれピークを有するように設定し、前記給電モジュールに供給する電力の前記駆動周波数は、前記共振周波数よりも高い駆動周波数帯域に現れる伝送特性のピーク値に対応する帯域であることを特徴としている。

[0024] 上記方法によれば、給電モジュールに供給する電力の駆動周波数に対する伝送特性の値が、給電モジュール及び受電モジュールにおける共振周波数よりも低い駆動周波数帯域及び共振周波数よりも高い駆動周波数帯域にそれぞれピークを有するように設定した場合に、給電モジュールに供給する電力の駆動周波数を、共振周波数よりも高い駆動周波数帯域に現れる伝送特性のピーク値に対応する帯域の周波数に設定することにより、比較的高い伝送特性を確保することができる。

また、給電モジュールの内周側に発生する磁界と受電モジュールの内周側に発生する磁界とが打ち消し合うことにより、給電モジュール及び受電モジュールの内周側に、磁界による影響が低減されて、給電モジュール及び受電モジュールの内周側以外の磁界強度よりも小さな磁界強度を有する磁界空間を形成することができる。これにより、形成した磁界空間に、磁界の影響を受けたくない回路等を格納することで、スペースの有効活用ができ、無線電力伝送装置自体の小型化を図ることが可能になる。

[0025] 上記課題を解決するための発明の一つは、上記記載の入力インピーダンス

の負荷変動応答性の調整方法により調整されたことを特徴とする無線電力伝送装置である。

[0026] 上記構成によれば、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整を、新たな機器を設けずに実現することができる。即ち、無線電力伝送装置の部品点数を増やさずに、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を調整することが可能となる。

[0027] 上記課題を解決するための発明の一つは、給電モジュールから、電力を消費する被給電機器が接続された受電モジュールに対して磁界を変化させて電力を供給する無線電力伝送装置の製造方法であって、前記給電モジュール、及び、受電モジュールにそれぞれ少なくとも1つのコイルを設け、隣接する前記コイル間における結合係数の値をそれぞれ調整することにより、前記被給電機器の負荷インピーダンスの単位変化量に対する当該無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量である負荷変動応答性を調整する工程を含むことを特徴としている。

[0028] 上記方法によれば、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整を、新たな機器を設けずにできる無線電力伝送装置を製造することができる。即ち、無線電力伝送装置の部品点数を増やさずに、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性を調整することが可能な無線電力伝送装置を製造することができる。

発明の効果

[0029] 無線電力伝送装置における給電装置及び受電装置に設けられたコイル間における結合係数を調整することにより、負荷変動応答性を調整し、もって、供給される電力量を制御することができる無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法等を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0030] [図1]無線電力伝送装置の概略説明図である。

[図2]無線電力伝送装置の等価回路の説明図である。

[図3]リチウムイオン二次電池の充電特性、及び、被給電機器の負荷インピー

ダンスの負荷変動特性を示すグラフである。

[図4]駆動周波数に対する伝送特性『S 2 1』の関係を示した説明図である。

[図5]測定実験 1 に係る測定結果を示すグラフである。

[図6]測定実験 2 に係る測定結果を示すグラフである。

[図7]測定実験 3 に係る測定結果を示すグラフである。

[図8]測定実験 4 に係る測定結果を示すグラフである。

[図9]測定実験 5 に係る測定結果を示すグラフである。

[図10]測定実験 6 に係る測定結果を示すグラフである。

[図11]無線電力伝送における、コイル間距離と結合係数との関係を示すグラフである。

[図12]無線電力伝送装置の製造方法を説明する説明図である。

[図13]無線電力伝送装置を含む無線式ヘッドセット及び充電器の設計方法を説明したフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0031] (実施形態)

以下に本発明に係る無線電力伝送装置、無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法、及び、無線電力伝送装置の製造方法の実施形態について説明する。まず、本実施形態で使用する無線電力伝送装置 1 について説明する。

[0032] (無線電力伝送装置 1 の構成)

無線電力伝送装置 1 は、図 1 に示すように、給電コイル 2 1 及び給電共振器 2 2 を備える給電モジュール 2 と、受電コイル 3 1 及び受電共振器 3 2 を備える受電モジュール 3 とを備えている。そして、給電モジュール 2 の給電コイル 2 1 に、給電モジュール 2 に供給する電力の駆動周波数を所定の値に設定した発振回路を備えた交流電源 6 を接続し、受電モジュール 3 の受電コイル 3 1 に、受電された交流電力を整流化する安定回路 7 及び過充電を防止する充電回路 8 を介してリチウムイオン二次電池 9 を接続している。なお、本実施形態では、安定回路 7、充電回路 8、及び、リチウムイオン二次電池

9は、被給電機器に相当する。

[0033] 給電コイル21は、交流電源6から得られた電力を電磁誘導によって給電共振器22に供給する役割を果たす。この給電コイル21は、図2に示すように、抵抗器 R_1 、コイル L_1 、及び、コンデンサ C_1 を要素とするRLC回路を構成している。なお、コイル L_1 部分は、銅線材（絶縁被膜付）を1回巻にして、コイル径を96mm ϕ に設定している。また、給電コイル21を構成する回路素子が有する合計のインピーダンスを Z_1 とし、本実施形態では、給電コイル21を構成する抵抗器 R_1 、コイル L_1 、及び、コンデンサ C_1 を要素とするRLC回路（回路素子）が有する合計のインピーダンスを Z_1 としている。

[0034] 受電コイル31は、給電共振器22から受電共振器32に磁界エネルギーとして伝送された電力を電磁誘導によって受電し、安定回路7及び充電回路8を介してリチウムイオン二次電池9に供給する役割を果たす。この受電コイル31は、給電コイル21同様に、図2に示すように、抵抗器 R_4 、コイル L_4 、及び、コンデンサ C_4 を要素とするRLC回路を構成している。なお、コイル L_4 部分は、銅線材（絶縁被膜付）を1回巻にして、コイル径96mm ϕ に設定している。また、受電コイル31を構成する回路素子が有する合計のインピーダンスを Z_4 とし、本実施形態では、受電コイル31を構成する抵抗器 R_4 、コイル L_4 、及び、コンデンサ C_4 を要素とするRLC回路（回路素子）が有する合計のインピーダンスを Z_4 としている。また、図2では、受電コイル31に接続された安定回路7、充電回路8及びリチウムイオン二次電池9の負荷インピーダンスを Z_L とし、当該負荷インピーダンス Z_L 測定時に便宜的に抵抗器 R_L に置き換えている。

[0035] 給電共振器22は、図2に示すように、抵抗器 R_2 、コイル L_2 、及び、コンデンサ C_2 を要素とするRLC回路を構成している。また、受電共振器32は、図2に示すように、抵抗器 R_3 、コイル L_3 、及び、コンデンサ C_3 を要素とするRLC回路を構成している。そして、給電共振器22及び受電共振器32は、それぞれ共振回路となり、磁界共鳴状態を創出する役割を果たす。ここで、磁界共鳴状態（共振現象）とは、2つ以上のコイルが共振周波数におい

て同調することをいう。また、給電共振器 2 2 を構成する回路素子が有する合計のインピーダンスを Z_2 とし、本実施形態では、給電共振器 2 2 を構成する、抵抗器 R_2 、コイル L_2 、及び、コンデンサ C_2 を要素とする R L C 回路（回路素子）が有する合計のインピーダンスを Z_2 としている。また、受電共振器 3 2 を構成する回路素子が有する合計のインピーダンスを Z_3 とし、本実施形態では、受電共振器 3 2 を構成する、抵抗器 R_3 、コイル L_3 、及び、コンデンサ C_3 を要素とする R L C 回路（回路素子）が有する合計のインピーダンスを Z_3 としている。

[0036] また、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 における共振回路としての R L C 回路では、インダクタンスを L 、コンデンサ容量を C とすると、（式 1）によって定まる f が共振周波数となる。そして、本実施形態における給電コイル 2 1、給電共振器 2 2、受電コイル 3 1、及び、受電共振器 3 2 の共振周波数は、12.8 MHz としている。

[数1]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (\text{式 1})$$

[0037] また、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 は、銅線材（絶縁被膜付）を 4 回巻にした、コイル径 96 mm ϕ のソレノイド型のコイルを使用している。また、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 における共振周波数は一致させている。なお、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 は、コイルを使用した共振器であれば、スパイラル型やソレノイド型などのコイルであってもよい。

[0038] また、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離を d_{12} とし、給電共振器 2 2 と受電共振器 3 2 との間の距離を d_{23} とし、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離を d_{34} としている（図 1 参照）。

[0039] また、図 2 に示すように、給電コイル 2 1 のコイル L_1 と給電共振器 2 2 のコイル L_2 との間の相互インダクタンスを M_{12} 、給電共振器 2 2 のコイル L_2 と受電共振器 3 2 のコイル L_3 との間の相互インダクタンスを M_{23} 、受電共振器 3 2 のコイル L_3 と受電コイル 3 1 のコイル L_4 との間の相互インダクタンスを M_3

4としている。また、無線電力伝送装置1において、コイル L_1 とコイル L_2 との間の結合係数を k_{12} と表記し、コイル L_2 とコイル L_3 との間の結合係数を k_{23} と表記し、コイル L_3 とコイル L_4 との間の結合係数を k_{34} と表記する。

[0040] なお、給電コイル21のRLC回路の R_1 、 L_1 、 C_1 、給電共振器22のRLC回路の R_2 、 L_2 、 C_2 、受電共振器32のRLC回路の R_3 、 L_3 、 C_3 、受電コイル31のRLC回路の R_4 、 L_4 、 C_4 における抵抗値、インダクタンス、コンデンサ容量、及び、結合係数 k_{12} 、 k_{23} 、 k_{34} は、設計・製造段階等で変更可能なパラメータとして、後述する（式3）の関係式を満たすように設定されていることが望ましい。

[0041] また、上記構成による無線電力伝送装置1（安定回路7、充電回路8及びリチウムイオン二次電池9含む）の回路図を示すと図1の下図のようになる。これは、無線電力伝送装置1全体を一つの入力インピーダンス Z_{in} に置き換えて示したものである。

[0042] そして、この電流 I_{in} を電圧 V_{in} 及び入力インピーダンス Z_{in} を踏まえた関係式で表すと（式2）のように示せる。

[数2]

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{Z_{in}} \quad \cdot \cdot \cdot \quad (\text{式2})$$

[0043] また、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} をより詳細に表すために、無線電力伝送装置1の構成を等価回路によって表すと図2に示すようになる。そして、図2の等価回路より、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} は、（式3）のように表記することができる。

[数3]

$$Z_{in} = Z_1 + \frac{(\omega M_{12})^2}{Z_2 + \frac{(\omega M_{23})^2}{Z_3 + \frac{(\omega M_{34})^2}{Z_4 + Z_i}}}$$

$$M_{12} = k_{12} \sqrt{L_1 L_2} \quad M_{23} = k_{23} \sqrt{L_2 L_3} \quad M_{34} = k_{34} \sqrt{L_3 L_4}$$

(k_{ij} は L_i と L_j の間における結合係数)

・・・ (式3)

[0044] そして、本実施形態における無線電力伝送装置1の給電コイル21、給電共振器22、受電共振器32、及び、受電コイル31におけるインピーダンス Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 、 Z_i は、それぞれ(式4)のように表記することができる。

[数4]

$$Z_1 = R_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right)$$

$$Z_2 = R_2 + j \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)$$

$$Z_3 = R_3 + j \left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3} \right)$$

$$Z_4 = R_4 + j \left(\omega L_4 - \frac{1}{\omega C_4} \right)$$

$$Z_i = R_i$$

・・・ (式4)

[0045] 次に、(式3)に(式4)を導入すると、(式5)のようになる。

[数5]

$$Z_{in} = R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) + \frac{(\omega M_{12})^2}{R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) + \frac{(\omega M_{23})^2}{R_3 + j\left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right) + \frac{(\omega M_{34})^2}{R_4 + j\left(\omega L_4 - \frac{1}{\omega C_4}\right) + R_5}} \cdots \quad (\text{式 } 5)$$

[0046] 上記無線電力伝送装置 1 によれば、給電共振器 2 2 の共振周波数と受電共振器 3 2 の共振周波数とを一致させた場合、給電共振器 2 2 と受電共振器 3 2 との間に磁界共鳴状態を創出することができる。給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 が共振した状態で磁界共鳴状態が創出されると、給電共振器 2 2 から受電共振器 3 2 に電力を磁界エネルギーとして伝送することができる。そして、受電共振器 3 2 で受電された電力が受電コイル 3 1、安定回路 7 及び充電回路 8 を介してリチウムイオン二次電池 9 に給電されて充電される。

[0047] (負荷変動応答性の調整方法)

上記無線電力伝送装置 1 の構成を踏まえて、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性の調整方法について説明する。

[0048] (負荷変動応答性について)

まず、上記無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性、及び、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を調整することができることの有用性について説明する。

[0049] 本実施形態では、電力が給電される被給電機器の一つとしてリチウムイオン二次電池 9 を使用している。そして、一般的に、リチウムイオン二次電池 9 を充電するには、定電流定電圧充電方式が使用されている。この定電流定電圧充電方式によるリチウムイオン二次電池 9 の充電では、図 3 (A) のリチウムイオン二次電池の充電特性に示すように、充電を開始してからしばらくの間は定電流による充電が行われる (CC : コンスタントカレント)。そして、定電流による充電が行われている間に電圧 (V_{ch}) が、所定の上限電圧 (本実施形態では、4.2 V) まで上昇する。電圧が上限電圧まで上昇すると

、その上限電圧に保持されたまま定電圧による充電が行われる（C V：コンスタントボルテージ）。定電圧による充電が行われると、電流値（ I_{ch} ）が減衰していき、所定の電流値、又は、所定時間経過後に充電完了となる。

[0050] そして、無線電力伝送装置 1 によって、リチウムイオン二次電池 9 を上記定電流定電圧充電方式によって充電する場合、定電流による充電（C C）から定電圧による充電（C V）に移行したときに、図 3（B）の被給電機器を構成する充電回路 8 及びリチウムイオン二次電池 9 に係る負荷インピーダンス Z_{89} の負荷変動特性に示すように、被給電機器を構成する充電回路 8 及びリチウムイオン二次電池 9 に供給される電流値（ I_{in} ）が減衰することによって、定電圧充電においては、負荷インピーダンス Z_{89} の値は上がることになる。即ち、本実施形態における被給電機器（安定回路 7、充電回路 8、リチウムイオン二次電池 9）全体としての負荷インピーダンス Z_L の値は上がることになる。

[0051] そして、被給電機器の負荷インピーダンス Z_L の値の上昇に伴い、被給電機器を含めた無線電力伝送装置 1 全体の入力インピーダンス Z_{in} も上がることになる。ここで、被給電機器の負荷インピーダンス Z_L の値の上昇に応じた入力インピーダンス Z_{in} の変化量を大きく調整することができれば、充電の際（特にコンスタントボルテージに移行後）に消費される電力量を低減することができる。なお、被給電機器の負荷インピーダンス Z_L の単位変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量のことを負荷変動応答性と定義する。

[0052] 即ち、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を高める調整をすることができれば、リチウムイオン二次電池等の充電の際に消費される電力量を低減することができる。

[0053] なお、被給電機器に関して、充電時に定電力充電が必要とされる二次電池を採用した場合には、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を小さく調整することができれば、例え被給電機器における負荷インピーダンス Z_L が変化したとしても、無線電力伝送装置 1 の入力イン

ピーダンス Z_{in} の値を維持することができるため（入力インピーダンス Z_{in} があまり変化しない状態）、充電の際に供給される電力を維持することが可能となる。

また、被給電機器に直接電力を消費しながら可動する機器を採用した場合（例えば、二次電池等を介さずに、供給電力で機器を直接駆動させるもの）、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を小さく調整することができれば、無線電力伝送における給電の際に、例え被給電機器における負荷インピーダンス Z_L が変化したとしても、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値を維持することができる。このため、被給電機器に電力を安定して給電することが可能となり、被給電機器の動作を安定（動作が不安定にならない）させることができる。

[0054] （結合係数による負荷変動応答性の調整）

上記のような無線電力伝送装置 1 では、給電モジュール 2 に供給する電力の駆動周波数を、給電モジュール 2 が備える給電コイル 2 1・給電共振器 2 2 及び受電モジュール 3 が備える受電コイル 3 1・受電共振器 3 2 が有する共振周波数と一致させることにより、無線電力伝送における電力伝送効率を最大にすることができることが一般的に知られており、電力伝送効率の最大化を求めて駆動周波数を共振周波数に設定にするのが一般的である。ここで、電力伝送効率とは、給電モジュール 2 に供給される電力に対する、受電モジュール 3 が受電する電力の比率のことをいう。

[0055] そうすると、無線電力伝送装置 1 において、電力伝送効率を最大化するには、駆動周波数と、給電モジュール 2 及び受電モジュール 3 の各 R L C 回路のそれぞれが有する共振周波数とが一致するようなコンデンサやコイルなどの容量条件・共振条件（ $\omega L = 1 / \omega C$ ）を満たすことが求められる。

[0056] 具体的に、無線電力伝送装置 1 において、電力伝送効率を最大にするために共振条件（ $\omega L = 1 / \omega C$ ）を満たした場合における無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} を、（式 5）に当てはめてみると、（ $\omega L_1 - 1 / \omega C_1 = 0$ ）、（ $\omega L_2 - 1 / \omega C_2 = 0$ ）、（ $\omega L_3 - 1 / \omega C_3 = 0$ ）、（ $\omega L_4 - 1 / \omega$

$C_4 = 0$) となり、(式 6) の関係式になる。

[数 6]

$$Z_{in} = R_1 + \frac{(\omega M_{12})^2}{R_2 + \frac{(\omega M_{23})^2}{R_3 + \frac{(\omega M_{34})^2}{R_4 + R_1}}}$$

・・・ (式 6)

[0057] 上記関係式 (式 6) によれば、無線電力伝送装置 1 において調整可能な主なパラメータとしては、給電コイル 2 1 の R L C 回路の R_1 、給電共振器 2 2 の R L C 回路の R_2 、受電共振器 3 2 の R L C 回路の R_3 、受電コイル 3 1 の R L C 回路の R_4 などの抵抗値、及び、結合係数 k_{12} 、 k_{23} 、 k_{34} が残ることが分かる。

[0058] 上記のように、無線電力伝送装置 1 における電力伝送効率を最大化するために、給電モジュール 2 に供給する電力の駆動周波数を共振周波数に一致させた場合、無線電力伝送装置 1 において調整可能なパラメータとして、結合係数 k_{12} 、 k_{23} 、 k_{34} を使用することができる。

[0059] また、給電モジュール 2 に供給する電力の駆動周波数を、給電モジュール 2 が備える給電共振器 2 2 及び受電モジュール 3 が備える受電共振器 3 2 が有する共振周波数と一致させない場合にも ($\omega L \neq 1/\omega C$)、無線電力伝送装置 1 において調整可能なパラメータとして、結合係数 k_{12} 、 k_{23} 、 k_{34} を使用することができる。

[0060] (結合係数の変化による入力インピーダンス Z_{in} の変化)

次に、結合係数 k_{12} 、 k_{34} を変化させた場合に、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} がどのような変化をするかを、条件を変えた測定実験 1 ～ 6 により説明する。

- [0061] 測定実験 1 ～ 6 では、図 2 に示した無線電力伝送装置 1 をネットワークアナライザ 110（本実施形態では、アジレント・テクノロジー株式会社製の E5061B を使用）に接続して、結合係数に対する入力インピーダンス Z_{in} の値を測定した。なお、測定実験 1 ～ 6 では、安定回路 7、充電回路 8、及び、リチウムイオン二次電池 9 の代わりに可変抵抗器 11（ R_L ）を接続して測定した。
- [0062] また、本測定実験においては、無線電力伝送装置 1 に供給する電力の駆動周波数に対する無線電力伝送装置 1 の伝送特性『S21』が、双峰性の性質を有するもので測定している。
- [0063] ここで、伝送特性『S21』とは、ネットワークアナライザ 110 に無線電力伝送装置 1 を接続して計測される信号を表しており、デシベル表示され、数値が大きいほど電力伝送効率が高いことを意味する。そして、無線電力伝送装置 1 に供給する電力の駆動周波数に対する無線電力伝送装置 1 の伝送特性『S21』は、給電モジュール 2 及び受電モジュール 3 の間の磁界による結びつき度合い（磁界結合）の強度により、単峰性の性質を有するものと双峰性の性質を有するものに分かれる。そして、単峰性とは、駆動周波数に対する伝送特性『S21』のピークが一つで、そのピークが共振周波数帯域（ f_0 ）において現れるものをいう（図 4 の破線 51 参照）。一方、双峰性とは、駆動周波数に対する伝送特性『S21』のピークが二つあり、その二つのピークが共振周波数よりも低い駆動周波数帯域（ f_L ）と共振周波数よりも高い駆動周波数帯域（ f_H ）において現れるものをいう（図 4 の実線 52 参照）。更に詳細に双峰性を定義すると、上記ネットワークアナライザ 110 に無線電力伝送装置を接続して計測される反射特性『S11』が二つのピークを有する状態をいう。従って、駆動周波数に対する伝送特性『S21』のピークが一見して一つに見えたとしても、計測されている反射特性『S11』が二つのピークを有する場合には、双峰性の性質を有するものとする。
- [0064] 上記単峰性の性質を有する無線電力伝送装置 1 においては、図 4 の破線 51 に示すように、駆動周波数が共振周波数 f_0 で伝送特性『S21』が最大化

する（電力伝送効率が最大化する）。

[0065] 一方、双峰性の性質を有する無線電力伝送装置 1 では、図 4 の実線 5 2 に示すように、伝送特性『S 2 1』は、共振周波数 f_0 よりも低い駆動周波数帯域 (f_L) と共振周波数 f_0 よりも高い駆動周波数帯域 (f_H) において最大化する。

[0066] なお、一般的に、給電共振器と受電共振器との間の距離が同じであれば、双峰性における伝送特性『S 2 1』の最大値 (f_L 又は f_H での伝送特性『S 2 1』の値) は、単峰性における伝送特性『S 2 1』の最大値 (f_0 での伝送特性『S 2 1』の値) よりも低い値になる（図 4 のグラフ参照）。

[0067] 具体的には、双峰性における低周波側のピーク付近の周波数 f_L に、給電モジュール 2 に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（同相共振モード）、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 が同位相で共振状態となり、給電共振器 2 2 に流れる電流の向きと受電共振器 3 2 に流れる電流の向きとが同じ向きになる。その結果、図 4 のグラフに示すように、電力伝送効率の最大化を目的にした一般的な無線電力伝送装置における伝送特性『S 2 1』（破線 5 1）には及ばないが、駆動周波数を給電モジュール 2 が備える給電共振器 2 2 及び受電モジュール 3 が備える受電共振器 3 2 が有する共振周波数と一致させない場合でも、伝送特性『S 2 1』の値を比較的高い値にすることができる。ここで、給電モジュール 2 におけるコイル（給電共振器 2 2）に流れる電流の向きと受電モジュール 3 におけるコイル（受電共振器 3 2）に流れる電流の向きとが同じ向きとなる共振状態を同相共振モードと呼ぶことにする。

[0068] また、上記同相共振モードでは、給電共振器 2 2 の外周側に発生する磁界と受電共振器 3 2 の外周側に発生する磁界とが打ち消し合うことにより、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 の外周側に、磁界による影響が低減されて、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 の外周側以外の磁界強度（例えば、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 の内周側の磁界強度）よりも小さな磁界強度を有する磁界空間を形成することができる。そして、この磁界空間に磁界の影響を低減させたい安定回路 7 や充電回路 8 やリチウムイオン二次電池 9

などを収納した場合、安定回路 7 や充電回路 8 やリチウムイオン二次電池 9 などに対して、磁界に起因する渦電流の発生を低減・防止して、発熱による悪影響を抑制することが可能となる。

[0069] 一方、双峰性における高周波側のピーク付近の周波数 f_H に、給電モジュール 2 に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（逆相共振モード）、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 が逆位相で共振状態となり、給電共振器 2 2 に流れる電流の向きと受電共振器 3 2 に流れる電流の向きとが逆向きになる。その結果、図 4 のグラフに示すように、電力伝送効率の最大化を目的にした一般的な無線電力伝送装置における伝送特性『S 2 1』（破線 5 1）には及ばないが、駆動周波数を給電モジュール 2 が備える給電共振器 2 2 及び受電モジュール 3 が備える受電共振器 3 2 が有する共振周波数と一致させない場合でも、伝送特性『S 2 1』の値を比較的高い値にすることができる。ここで、給電モジュール 2 におけるコイル（給電共振器 2 2）に流れる電流の向きと受電モジュール 3 におけるコイル（受電共振器 3 2）に流れる電流の向きとが逆向きとなる共振状態を逆相共振モードと呼ぶことにする。

[0070] また、上記逆相共振モードでは、給電共振器 2 2 の内周側に発生する磁界と受電共振器 3 2 の内周側に発生する磁界とが打ち消し合うことにより、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 の内周側に、磁界による影響が低減されて、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 の内周側以外の磁界強度（例えば、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 の外周側の磁界強度）よりも小さな磁界強度を有する磁界空間を形成することができる。そして、この磁界空間に磁界の影響を低減させたい安定回路 7 や充電回路 8 やリチウムイオン二次電池 9などを収納した場合、安定回路 7 や充電回路 8 やリチウムイオン二次電池 9 などに対して、磁界に起因する渦電流の発生を低減・防止して、発熱による悪影響を抑制することが可能となる。また、この逆相共振モードにより形成される磁界空間は、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 の内周側に形成されるので、この空間に安定回路 7 や充電回路 8 やリチウムイオン二次電池 9 などの電子部品を組み込むことにより無線電力伝送装置 1 自体のコンパクト化

- ・設計自由度の向上が実現される。

[0071] (測定実験 1 : 結合係数 k_{12} の値を変えた場合の Z_{in} の負荷変動応答性)

測定実験 1 に使用する無線電力伝送装置 1 では、給電コイル 2 1 は、抵抗器 R_1 、コイル L_1 を要素とする RL 回路を構成しており（共振なし）、コイル L_1 部分は、銅線材（絶縁被膜付）を 1 回巻にして、コイル径を $96\text{ mm } \phi$ に設定している。同様に、受電コイル 3 1 は、抵抗器 R_4 、コイル L_4 を要素とする RL 回路を構成しており（共振なし）、コイル L_4 部分は、銅線材（絶縁被膜付）を 1 回巻にして、コイル径を $96\text{ mm } \phi$ に設定している。また、給電共振器 2 2 は、抵抗器 R_2 、コイル L_2 、及び、コンデンサ C_2 を要素とする RLC 回路を構成しており、コイル L_2 部分は、銅線材（絶縁被膜付）を 4 回巻にした、コイル径 $96\text{ mm } \phi$ のソレノイド型のコイルを使用している。また、受電共振器 3 2 は、抵抗器 R_3 、コイル L_3 、及び、コンデンサ C_3 を要素とする RLC 回路を構成しており、コイル L_3 部分は、銅線材（絶縁被膜付）を 4 回巻にした、コイル径 $96\text{ mm } \phi$ のソレノイド型のコイルを使用している。そして、測定実験 1 に使用する無線電力伝送装置 1 における R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 の値をそれぞれ、 $0.05\ \Omega$ 、 $0.5\ \Omega$ 、 $0.5\ \Omega$ 、 $0.05\ \Omega$ に設定した。また、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 の値をそれぞれ、 $0.3\ \mu\text{H}$ 、 $4\ \mu\text{H}$ 、 $4\ \mu\text{H}$ 、 $0.3\ \mu\text{H}$ に設定した。また、給電共振器 2 2 及び受電共振器 3 2 における共振周波数は 12.8 MHz である。

[0072] 測定実験 1 では、結合係数 k_{23} を 0.10 、結合係数 k_{34} を 0.35 にそれぞれ固定したうえで、可変抵抗器 1 1 (R_1) の値を $51\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $270\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ の 4 つの値に変えた場合の無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値を、結合係数 k_{12} の値を 0.11 、 0.15 、 0.22 、 0.35 の 4 つの値に設定して測定した（結合係数の調整方法についての詳細は後述する）。そして、双峰性における低周波側のピーク付近の周波数 f_L に、給電モジュール 2 に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（同相共振モード： 12.2 MHz ）の測定値を図 5 (A) に示す。また、双峰性における高周波側のピーク付近の周波数 f_H に、給電モジュール 2 に供給する

交流電力の駆動周波数を設定した場合（逆相共振モード：13.4 MHz）の測定値を図5（B）に示す。ここで、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 Ω 、100 Ω 、270 Ω 、500 Ω の4つの値に変えて測定することによって、上述した図3（B）の負荷インピーダンス Z_L の負荷変動特性に示すように、供給される電流値が減衰することによって、定電圧充電において、被給電機器（安定回路7、充電回路8、リチウムイオン二次電池9）の負荷インピーダンス Z_L の値が上昇する現象を疑似的に再現している。

[0073] 図5（A）の同相共振モードの測定結果より、結合係数 k_{12} の値を0.11に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 $\Omega \rightarrow$ 100 Ω 、 $\rightarrow$ 270 Ω 、 $\rightarrow$ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、31.4 Ω 、 $\rightarrow$ 33.1 Ω 、 $\rightarrow$ 37.8 Ω 、 $\rightarrow$ 40.9 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $40.9 - 31.4 = 9.5 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を0.15に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 $\Omega \rightarrow$ 100 Ω 、 $\rightarrow$ 270 Ω 、 $\rightarrow$ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、35.9 Ω 、 $\rightarrow$ 39.0 Ω 、 $\rightarrow$ 48.2 Ω 、 $\rightarrow$ 54.5 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $54.5 - 35.9 = 18.6 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を0.22に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 $\Omega \rightarrow$ 100 Ω 、 $\rightarrow$ 270 Ω 、 $\rightarrow$ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、47.5 Ω 、 $\rightarrow$ 54.8 Ω 、 $\rightarrow$ 76.0 Ω 、 $\rightarrow$ 90.1 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $90.1 - 47.5 = 42.6 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.35 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $79.0\ \Omega$ 、 $\rightarrow 97.1\ \Omega$ 、 $\rightarrow 148.5\ \Omega$ 、 $\rightarrow 183.1\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $183.1 - 79.0 = 104.1\ \Omega$ である。

上記のように、同相共振モードにおいて、結合係数 k_{12} の値を 0.11、 $\rightarrow 0.15$ 、 $\rightarrow 0.22$ 、 $\rightarrow 0.35$ と大きくすることにより、可変抵抗器 11 (R_L) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{12} の値を 0.35、 $\rightarrow 0.22$ 、 $\rightarrow 0.15$ 、 $\rightarrow 0.11$ と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0074] また、図 5 (B) の逆相共振モードの測定結果においても同様に、結合係数 k_{12} の値を 0.11 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $27.5\ \Omega$ 、 $\rightarrow 28.7\ \Omega$ 、 $\rightarrow 30.7\ \Omega$ 、 $\rightarrow 31.8\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $31.8 - 27.5 = 4.3\ \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.15 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $28.1\ \Omega$ 、 $\rightarrow 29.4\ \Omega$ 、 $\rightarrow 33.5\ \Omega$ 、 $\rightarrow 35.8\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $35.8 - 28.1 = 7.7\ \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.22 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $30.2\ \Omega$ 、 $\rightarrow 32.6\ \Omega$ 、 $\rightarrow 43.0\ \Omega$ 、 $\rightarrow 49.1\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $49.1 - 30.2 = 18.9\ \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.35 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $33.3\ \Omega$ 、 $\rightarrow 50.3\ \Omega$ 、 $\rightarrow 80.6\ \Omega$ 、 $\rightarrow 96.7\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $96.7 - 33.3 = 63.4\ \Omega$ である。

上記のように、逆相共振モードにおいて、結合係数 k_{12} の値を 0.11、 $\rightarrow$ 0.15、 $\rightarrow$ 0.22、 $\rightarrow$ 0.35 と大きくすることにより、可変抵抗器 11 (R_L) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{12} の値を 0.35、 $\rightarrow$ 0.22、 $\rightarrow$ 0.15、 $\rightarrow$ 0.11 と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0075] (測定実験 2 : 結合係数 k_{12} の値を変えた場合の Z_{in} の負荷変動応答性)

測定実験 2 に使用する無線電力伝送装置 1 では、測定実験 1 と異なり、給電コイル 21 は、抵抗器 R_1 、コイル L_1 、及び、コンデンサ C_1 を要素とする RLC 回路を構成しており (共振あり)、コイル L_1 部分は、銅線材 (絶縁被膜付) を 1 回巻にして、コイル径を $96\text{ mm } \phi$ に設定している。同様に、受電コイル 31 も、抵抗器 R_4 、コイル L_4 、及び、コンデンサ C_4 を要素とする RLC 回路を構成しており、コイル L_4 部分は、銅線材 (絶縁被膜付) を 1 回巻

にして、コイル径を96mmφに設定している。なお、その他の構成は、測定実験1と同様である。そして、測定実験2に使用する無線電力伝送装置1における R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 の値をそれぞれ、0.05Ω、0.5Ω、0.5Ω、0.05Ωに設定した。また、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 の値をそれぞれ、0.3μH、4μH、4μH、0.3μHに設定した。また、給電コイル21、給電共振器22、受電共振器32、及び、受電コイル31における共振周波数は12.8MHzである。

[0076] 測定実験2では、結合係数 k_{23} を0.10、結合係数 k_{34} を0.35にそれぞれ固定したうえで、可変抵抗器11 (R_L) の値を51Ω、100Ω、270Ω、500Ωの4つの値に変えた場合の無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値を、結合係数 k_{12} の値を0.11、0.15、0.22、0.35の4つの値に設定して測定した（結合係数の調整方法についての詳細は後述する）。そして、双峰性における低周波側のピーク付近の周波数 f_L に、給電モジュール2に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（同相共振モード：12.2MHz）の測定値を図6（A）に示す。また、双峰性における高周波側のピーク付近の周波数 f_H に、給電モジュール2に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（逆相共振モード：13.4MHz）の測定値を図6（B）に示す。

[0077] 図6（A）の同相共振モードの測定結果より、結合係数 k_{12} の値を0.11に設定した場合、可変抵抗器11 (R_L) の値を51Ω→100Ω、→270Ω、→500Ωの順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、6.5Ω、→10.0Ω、→17.3Ω、→21.8Ωという具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11 (R_L) の値が51Ωから500Ωに上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、21.8−6.5=15.3Ωである。

また、結合係数 k_{12} の値を0.15に設定した場合、可変抵抗器11 (R_L) の値を51Ω→100Ω、→270Ω、→500Ωの順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、11.5Ω、

→ 18.1 Ω、→ 31.8 Ω、→ 40.3 Ωという具合に上昇した。
 この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 51 Ω から 500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $40.3 - 11.5 = 28.8$ Ω である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.22 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を 51 Ω → 100 Ω、→ 270 Ω、→ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、22.4 Ω、→ 35.4 Ω、→ 62.2 Ω、→ 79.0 Ω という具合に上昇した。
 この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 51 Ω から 500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $79.0 - 22.4 = 56.6$ Ω である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.35 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を 51 Ω → 100 Ω、→ 270 Ω、→ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、48.8 Ω、→ 77.6 Ω、→ 136.5 Ω、→ 173.1 Ω という具合に上昇した。
 この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 51 Ω から 500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $173.1 - 48.8 = 124.3$ Ω である。

上記のように、同相共振モードにおいて、結合係数 k_{12} の値を 0.11、→ 0.15、→ 0.22、→ 0.35 と大きくすることにより、可変抵抗器 11 (R_L) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{12} の値を 0.35、→ 0.22、→ 0.15、→ 0.11 と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0078] また、図 6 (B) の逆相共振モードの測定結果においても同様に、結合係数 k_{12} の値を 0.11 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を 51 Ω → 100 Ω、→ 270 Ω、→ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電

力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 5.5Ω 、 $\rightarrow 6.9 \Omega$ 、 $\rightarrow 9.3 \Omega$ 、 $\rightarrow 10.7 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 5.1Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $10.7 - 5.5 = 5.2 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.15 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $5.1 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 6.8Ω 、 $\rightarrow 9.5 \Omega$ 、 $\rightarrow 14.9 \Omega$ 、 $\rightarrow 18.0 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 5.1Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $18.0 - 6.8 = 11.2 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.22 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $5.1 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 13.6Ω 、 $\rightarrow 19.3 \Omega$ 、 $\rightarrow 31.2 \Omega$ 、 $\rightarrow 38.1 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 5.1Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $38.1 - 13.6 = 24.5 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.35 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $5.1 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 35.9Ω 、 $\rightarrow 49.8 \Omega$ 、 $\rightarrow 79.0 \Omega$ 、 $\rightarrow 95.9 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 5.1Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $95.9 - 35.9 = 60.0 \Omega$ である。

上記のように、逆相共振モードにおいても、結合係数 k_{12} の値を 0.11 、 $\rightarrow 0.15$ 、 $\rightarrow 0.22$ 、 $\rightarrow 0.35$ と大きくすることにより、可変抵抗器 11 (R_L) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答

性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{12} の値を 0.35、 $\rightarrow$ 0.22、 $\rightarrow$ 0.15、 $\rightarrow$ 0.11 と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0079] (測定実験3：結合係数 k_{12} の値を変えた場合の Z_{in} の負荷変動応答性)

測定実験3に使用する無線電力伝送装置1では、測定実験1、2と異なり、給電コイル21、給電共振器22、受電共振器32、受電コイル31のコイル部分に、平面上にコイルを巻き回して作成したパターンコイルを使用している。具体的には、給電コイル21は、抵抗器 R_1 、コイル L_1 、及び、コンデンサ C_1 を要素とする RLC 回路を構成しており（共振あり）、コイル L_1 部分は、銅箔のエッチングにより形成した12回巻き、コイル径35mmφのパターンコイルを使用している。同様に、受電コイル31は、抵抗器 R_4 、コイル L_4 、及び、コンデンサ C_4 を要素とする RLC 回路を構成しており、コイル L_4 部分は、銅箔のエッチングにより形成した12回巻き、コイル径35mmφのパターンコイルを使用している。また、給電共振器22は、抵抗器 R_2 、コイル L_2 、及び、コンデンサ C_2 を要素とする RLC 回路を構成しており、コイル L_2 部分は、銅箔のエッチングにより形成した12回巻き、コイル径35mmφのパターンコイルを使用している。また、受電共振器32は、抵抗器 R_3 、コイル L_3 、及び、コンデンサ C_3 を要素とする RLC 回路を構成しており、コイル L_3 部分は、銅箔のエッチングにより形成した12回巻き、コイル径35mmφのパターンコイルを使用している。そして、測定実験3に使用する無線電力伝送装置1における R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 の値をそれぞれ、1.8Ω、1.8Ω、1.8Ω、1.8Ωに設定した。また、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 の値をそれぞれ、2.5μH、2.5μH、2.5μH、2.5μHに設定した。また、給電コイル21、給電共振器22、受電共振器32、及び、受電コイル31における共振周波数は8.0MHzである。

[0080] 測定実験3では、結合係数 k_{23} を0.05、結合係数 k_{34} を0.08にそれぞれ固定したうえで、可変抵抗器11 (R_1) の値を51Ω、100Ω、270Ω、500Ωの4つの値に変えた場合の無線電力伝送装置1の入力インピ

ーダンス Z_{in} の値を、結合係数 k_{12} の値を 0.05、0.06、0.07、0.08 の 4 つの値に設定して測定した（結合係数の調整方法についての詳細は後述する）。そして、双峰性における低周波側のピーク付近の周波数 f_L に、給電モジュール 2 に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（同相共振モード：7.9 MHz）の測定値を図 7（A）に示す。また、双峰性における高周波側のピーク付近の周波数 f_H に、給電モジュール 2 に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（逆相共振モード：8.2 MHz）の測定値を図 7（B）に示す。

[0081] 図 7（A）の同相共振モードの測定結果より、結合係数 k_{12} の値を 0.05 に設定した場合、可変抵抗器 11（ R_L ）の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 9.1Ω 、 $\rightarrow 10.5\Omega$ 、 $\rightarrow 12.3\Omega$ 、 $\rightarrow 12.8\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11（ R_L ）の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $12.8 - 9.1 = 3.7\Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.06 に設定した場合、可変抵抗器 11（ R_L ）の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 18.0Ω 、 $\rightarrow 20.7\Omega$ 、 $\rightarrow 24.0\Omega$ 、 $\rightarrow 25.4\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11（ R_L ）の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $25.4 - 18.0 = 7.4\Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.07 に設定した場合、可変抵抗器 11（ R_L ）の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 29.5Ω 、 $\rightarrow 34.1\Omega$ 、 $\rightarrow 39.8\Omega$ 、 $\rightarrow 41.9\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11（ R_L ）の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $41.9 - 29.5 = 12.4\Omega$ であ

る。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.08 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 35.9Ω 、 $\rightarrow 42.3\Omega$ 、 $\rightarrow 49.9\Omega$ 、 $\rightarrow 51.9\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $51.9 - 35.9 = 16.0\Omega$ である。

上記のように、同相共振モードにおいて、結合係数 k_{12} の値を 0.05、 $\rightarrow$ 0.06、 $\rightarrow$ 0.07、 $\rightarrow$ 0.08 と大きくすることにより、可変抵抗器 11 (R_L) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{12} の値を 0.08、 $\rightarrow$ 0.07、 $\rightarrow$ 0.06、 $\rightarrow$ 0.05 と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0082] また、図 7 (B) の逆相共振モードの測定結果においても同様に、結合係数 k_{12} の値を 0.05 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 8.7Ω 、 $\rightarrow 9.5\Omega$ 、 $\rightarrow 10.5\Omega$ 、 $\rightarrow 10.8\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $10.8 - 8.7 = 2.1\Omega$ である。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.06 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 14.9Ω 、 $\rightarrow 15.8\Omega$ 、 $\rightarrow 17.3\Omega$ 、 $\rightarrow 18.0\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $18.0 - 14.9 = 3.1\Omega$ である。

。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.07 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_1) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $25.0\ \Omega$ 、 $\rightarrow 26.6\ \Omega$ 、 $\rightarrow 29.4\ \Omega$ 、 $\rightarrow 30.5\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_1) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $30.5 - 25.0 = 5.5\ \Omega$ である。

。

また、結合係数 k_{12} の値を 0.08 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_1) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $32.1\ \Omega$ 、 $\rightarrow 34.2\ \Omega$ 、 $\rightarrow 37.8\ \Omega$ 、 $\rightarrow 38.7\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_1) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $38.7 - 32.1 = 6.6\ \Omega$ である。

。

上記のように、逆相共振モードにおいても、結合係数 k_{12} の値を 0.05、 $\rightarrow 0.06$ 、 $\rightarrow 0.07$ 、 $\rightarrow 0.08$ と大きくすることにより、可変抵抗器 11 (R_1) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{12} の値を 0.08、 $\rightarrow 0.07$ 、 $\rightarrow 0.06$ 、 $\rightarrow 0.05$ と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0083] (測定実験 4 : 結合係数 k_{34} の値を変えた場合の Z_{in} の負荷変動応答性)

測定実験 4 に使用する無線電力伝送装置 1 では、測定実験 1 と同様に、給電コイル 21 は、抵抗器 R_1 、コイル L_1 を要素とする RL 回路を構成しており (共振なし)、コイル L_1 部分は、銅線材 (絶縁被膜付) を 1 回巻にして、コイル径を $96\text{ mm } \phi$ に設定している。同様に、受電コイル 31 は、抵抗器 R_4 、コイル L_4 を要素とする RL 回路を構成しており (共振なし)、コイル L_4 部

分は、銅線材（絶縁被膜付）を1回巻にして、コイル径を96mm ϕ に設定している。なお、その他の構成も、測定実験1と同様である。また、測定実験4に使用する無線電力伝送装置1における R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 の値をそれぞれ、0.05 Ω 、0.5 Ω 、0.5 Ω 、0.05 Ω に設定した。また、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 の値をそれぞれ、0.3 μH 、4 μH 、4 μH 、0.3 μH に設定した（測定実験1と同じ）。また、給電共振器22及び受電共振器32における共振周波数は12.8MHzである。

[0084] 測定実験4では、結合係数 k_{12} を0.35、結合係数 k_{23} を0.10にそれぞれ固定したうえで、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 Ω 、100 Ω 、270 Ω 、500 Ω の4つの値に変えた場合の無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値を、結合係数 k_{34} の値を0.11、0.15、0.22、0.35の4つの値に設定して測定した（結合係数の調整方法についての詳細は後述する）。そして、双峰性における低周波側のピーク付近の周波数 f_L に、給電モジュール2に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（同相共振モード：12.2MHz）の測定値を図8（A）に示す。また、双峰性における高周波側のピーク付近の周波数 f_H に、給電モジュール2に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（逆相共振モード：13.4MHz）の測定値を図8（B）に示す。

[0085] 図8（A）の同相共振モードの測定結果より、結合係数 k_{34} の値を0.11に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 $\Omega \rightarrow$ 100 Ω 、 $\rightarrow$ 270 Ω 、 $\rightarrow$ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、202.5 Ω 、 $\rightarrow$ 228.2 Ω 、 $\rightarrow$ 259.1 Ω 、 $\rightarrow$ 269.2 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、269.2－202.5＝66.7 Ω である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.15に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 $\Omega \rightarrow$ 100 Ω 、 $\rightarrow$ 270 Ω 、 $\rightarrow$ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、165.8 Ω

、 $\rightarrow 197.7\Omega$ 、 $\rightarrow 242.0\Omega$ 、 $\rightarrow 259.3\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11 (R_L) の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $259.3 - 165.8 = 93.5\Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.22に設定した場合、可変抵抗器11 (R_L) の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 127.4Ω 、 $\rightarrow 152.8\Omega$ 、 $\rightarrow 209.7\Omega$ 、 $\rightarrow 230.2\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11 (R_L) の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $230.2 - 127.4 = 102.8\Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.35に設定した場合、可変抵抗器11 (R_L) の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 79.0Ω 、 $\rightarrow 97.1\Omega$ 、 $\rightarrow 148.5\Omega$ 、 $\rightarrow 183.1\Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11 (R_L) の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $183.1 - 79.0 = 104.1\Omega$ である。

上記のように、同相共振モードにおいて、結合係数 k_{34} の値を0.11、 $\rightarrow$ 0.15、 $\rightarrow$ 0.22、 $\rightarrow$ 0.35と大きくすることにより、可変抵抗器11 (R_L) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{34} の値を0.35、 $\rightarrow$ 0.22、 $\rightarrow$ 0.15、 $\rightarrow$ 0.11と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0086] また、図8 (B) の逆相共振モードの測定結果においても同様に、結合係数 k_{34} の値を0.11に設定した場合、可変抵抗器11 (R_L) の値を $51\Omega \rightarrow 100\Omega$ 、 $\rightarrow 270\Omega$ 、 $\rightarrow 500\Omega$ の順に大きくしていくと、無線電

力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $117.1\ \Omega$ 、 $\rightarrow 127.4\ \Omega$ 、 $\rightarrow 138.0\ \Omega$ 、 $\rightarrow 141.3\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $141.3 - 117.1 = 24.2\ \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.15 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $96.1\ \Omega$ 、 $\rightarrow 112.8\ \Omega$ 、 $\rightarrow 131.1\ \Omega$ 、 $\rightarrow 137.6\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $137.6 - 96.1 = 41.5\ \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.22 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $66.1\ \Omega$ 、 $\rightarrow 86.8\ \Omega$ 、 $\rightarrow 115.0\ \Omega$ 、 $\rightarrow 126.5\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $126.5 - 66.1 = 60.4\ \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.35 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $33.3\ \Omega$ 、 $\rightarrow 50.3\ \Omega$ 、 $\rightarrow 80.6\ \Omega$ 、 $\rightarrow 96.7\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $96.7 - 33.3 = 63.4\ \Omega$ である。

上記のように、逆相共振モードにおいて、結合係数 k_{34} の値を 0.11 、 $\rightarrow 0.15$ 、 $\rightarrow 0.22$ 、 $\rightarrow 0.35$ と大きくすることにより、可変抵

抗器 1 1 (R_1) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{34} の値を 0.35、 $\rightarrow$ 0.22、 $\rightarrow$ 0.15、 $\rightarrow$ 0.11 と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0087] (測定実験 5 : 結合係数 k_{34} の値を変えた場合の Z_{in} の負荷変動応答性)

測定実験 5 に使用する無線電力伝送装置 1 では、測定実験 4 と異なり、給電コイル 2 1 は、抵抗器 R_1 、コイル L_1 、及び、コンデンサ C_1 を要素とする RLC 回路を構成しており (共振あり)、コイル L_1 部分は、銅線材 (絶縁被膜付) を 1 回巻にして、コイル径を 96 mm ϕ に設定している。同様に、受電コイル 3 1 も、抵抗器 R_4 、コイル L_4 、及び、コンデンサ C_4 を要素とする RLC 回路を構成しており、コイル L_4 部分は、銅線材 (絶縁被膜付) を 1 回巻にして、コイル径を 96 mm ϕ に設定している。なお、その他の構成は、測定実験 4 と同様である。そして、測定実験 5 に使用する無線電力伝送装置 1 における R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 の値をそれぞれ、0.05 Ω 、0.5 Ω 、0.5 Ω 、0.05 Ω に設定した。また、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 の値をそれぞれ、0.3 μ H、4 μ H、4 μ H、0.3 μ H に設定した。また、給電コイル 2 1、給電共振器 2 2、受電共振器 3 2、及び、受電コイル 3 1 における共振周波数は 12.8 MHz である。

[0088] 測定実験 5 では、結合係数 k_{12} を 0.35、結合係数 k_{23} を 0.10 にそれぞれ固定したうえで、可変抵抗器 1 1 (R_1) の値を 51 Ω 、100 Ω 、270 Ω 、500 Ω の 4 つの値に変えた場合の無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値を、結合係数 k_{34} の値を 0.11、0.15、0.22、0.35 の 4 つの値に設定して測定した (結合係数の調整方法についての詳細は後述する)。そして、双峰性における低周波側のピーク付近の周波数 f_L に、給電モジュール 2 に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合 (同相共振モード : 12.2 MHz) の測定値を図 9 (A) に示す。また、双峰性における高周波側のピーク付近の周波数 f_H に、給電モジュール 2 に供給する

交流電力の駆動周波数を設定した場合（逆相共振モード：13.4 MHz）の測定値を図9（B）に示す。

[0089] 図9（A）の同相共振モードの測定結果より、結合係数 k_{34} の値を0.11に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 Ω → 100 Ω 、→ 270 Ω 、→ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、170.5 Ω 、→ 204.9 Ω 、→ 238.0 Ω 、→ 246.7 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、246.7 − 170.5 = 76.2 Ω である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.15に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 Ω → 100 Ω 、→ 270 Ω 、→ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、134.9 Ω 、→ 176.5 Ω 、→ 222.8 Ω 、→ 239.7 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、239.7 − 134.9 = 104.8 Ω である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.22に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 Ω → 100 Ω 、→ 270 Ω 、→ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、94.2 Ω 、→ 133.4 Ω 、→ 193.8 Ω 、→ 216.2 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、216.2 − 94.2 = 122.0 Ω である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.35に設定した場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値を51 Ω → 100 Ω 、→ 270 Ω 、→ 500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、48.8 Ω 、→ 77.6 Ω 、→ 136.5 Ω 、→ 173.1 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11（ R_L ）の値が51 Ω から500 Ω に上昇した

場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $173.1 - 48.8 = 124.3 \Omega$ である。

上記のように、同相共振モードにおいて、結合係数 k_{34} の値を 0.11 、 $\rightarrow 0.15$ 、 $\rightarrow 0.22$ 、 $\rightarrow 0.35$ と大きくすることにより、可変抵抗器 $11 (R_L)$ (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{34} の値を 0.35 、 $\rightarrow 0.22$ 、 $\rightarrow 0.15$ 、 $\rightarrow 0.11$ と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0090] また、図 9 (B) の逆相共振モードの測定結果においても同様に、結合係数 k_{34} の値を 0.11 に設定した場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値を $51 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 105.5Ω 、 $\rightarrow 119.3 \Omega$ 、 $\rightarrow 130.6 \Omega$ 、 $\rightarrow 133.9 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $133.9 - 105.5 = 28.4 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.15 に設定した場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値を $51 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 86.6Ω 、 $\rightarrow 105.2 \Omega$ 、 $\rightarrow 123.4 \Omega$ 、 $\rightarrow 129.3 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $129.3 - 86.6 = 42.7 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.22 に設定した場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値を $51 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 63.0Ω 、 $\rightarrow 83.3 \Omega$ 、 $\rightarrow 110.9 \Omega$ 、 $\rightarrow 122.1 \Omega$ という具合に上昇し

た。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $122.1 - 63.0 = 59.1\ \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.35 に設定した場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値を $51\ \Omega \rightarrow 100\ \Omega$ 、 $\rightarrow 270\ \Omega$ 、 $\rightarrow 500\ \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 $35.9\ \Omega$ 、 $\rightarrow 49.8\ \Omega$ 、 $\rightarrow 79.0\ \Omega$ 、 $\rightarrow 95.9\ \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 11 (R_L) の値が $51\ \Omega$ から $500\ \Omega$ に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $95.9 - 35.9 = 60.0\ \Omega$ である。

上記のように、逆相共振モードにおいても、結合係数 k_{34} の値を 0.11 、 $\rightarrow 0.15$ 、 $\rightarrow 0.22$ 、 $\rightarrow 0.35$ と大きくすることにより、可変抵抗器 11 (R_L) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{34} の値を 0.35 、 $\rightarrow 0.22$ 、 $\rightarrow 0.15$ 、 $\rightarrow 0.11$ と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0091] (測定実験 6：結合係数 k_{34} の値を変えた場合の Z_{in} の負荷変動応答性)

測定実験 6 に使用する無線電力伝送装置 1 では、測定実験 4、5 と異なり、給電コイル 21、給電共振器 22、受電共振器 32、受電コイル 31 のコイル部分に、平面上にコイルを巻き回して作成したパターンコイルを使用している。具体的には、給電コイル 21 は、抵抗器 R_1 、コイル L_1 、及び、コンデンサ C_1 を要素とする RLC 回路を構成しており (共振あり)、コイル L_1 部分は、銅箔のエッチングにより形成した 12 回巻き、コイル径 $35\text{ mm } \phi$ のパターンコイルを使用している。同様に、受電コイル 31 は、抵抗器 R_4 、コイル L_4 、及び、コンデンサ C_4 を要素とする RLC 回路を構成しており、コイル L_4 部分は、銅箔のエッチングにより形成した 12 回巻き、コイル径 $35\text{ mm } \phi$ のパターンコイルを使用している。また、給電共振器 22 は、抵抗器 R_2

、コイル L_2 、及び、コンデンサ C_2 を要素とするRLC回路を構成しており、コイル L_2 部分は、銅箔のエッチングにより形成した12回巻き、コイル径35mmφのパターンコイルを使用している。また、受電共振器32は、抵抗器 R_3 、コイル L_3 、及び、コンデンサ C_3 を要素とするRLC回路を構成しており、コイル L_3 部分は、銅箔のエッチングにより形成した12回巻き、コイル径35mmφのパターンコイルを使用している。そして、測定実験6に使用する無線電力伝送装置1における R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 の値をそれぞれ、1.8Ω、1.8Ω、1.8Ω、1.8Ωに設定した。また、 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 の値をそれぞれ、2.5μH、2.5μH、2.5μH、2.5μHに設定した。また、給電コイル21、給電共振器22、受電共振器32、及び、受電コイル31における共振周波数は8.0MHzである。

[0092] 測定実験6では、結合係数 k_{12} を0.08、結合係数 k_{23} を0.05にそれぞれ固定したうえで、可変抵抗器11 (R_1) の値を51Ω、100Ω、270Ω、500Ωの4つの値に変えた場合の無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値を、結合係数 k_{34} の値を0.05、0.06、0.07、0.08の4つの値に設定して測定した（結合係数の調整方法についての詳細は後述する）。そして、双峰性における低周波側のピーク付近の周波数 f_L に、給電モジュール2に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（同相共振モード：7.9MHz）の測定値を図10（A）に示す。また、双峰性における高周波側のピーク付近の周波数 f_H に、給電モジュール2に供給する交流電力の駆動周波数を設定した場合（逆相共振モード：8.2MHz）の測定値を図10（B）に示す。

[0093] 図10（A）の同相共振モードの測定結果より、結合係数 k_{34} の値を0.05に設定した場合、可変抵抗器11 (R_1) の値を51Ω→100Ω、→270Ω、→500Ωの順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、55.8Ω、→59.7Ω、→62.6Ω、→63.5Ωという具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11 (R_1) の値が51Ωから500Ωに上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量

は、 $63.5 - 55.8 = 7.7 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.06 に設定した場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値を $51 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 50.2Ω 、 $\rightarrow 56.1 \Omega$ 、 $\rightarrow 60.6 \Omega$ 、 $\rightarrow 62.0 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $62.0 - 50.2 = 11.8 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.07 に設定した場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値を $51 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 45.3Ω 、 $\rightarrow 51.4 \Omega$ 、 $\rightarrow 58.6 \Omega$ 、 $\rightarrow 61.0 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $61.0 - 45.3 = 15.7 \Omega$ である。

また、結合係数 k_{34} の値を 0.08 に設定した場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値を $51 \Omega \rightarrow 100 \Omega$ 、 $\rightarrow 270 \Omega$ 、 $\rightarrow 500 \Omega$ の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値は、 35.9Ω 、 $\rightarrow 42.3 \Omega$ 、 $\rightarrow 49.9 \Omega$ 、 $\rightarrow 51.9 \Omega$ という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器 $11 (R_L)$ の値が 51Ω から 500Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、 $51.9 - 35.9 = 16.0 \Omega$ である。

上記のように、同相共振モードにおいて、結合係数 k_{34} の値を 0.05 、 $\rightarrow 0.06$ 、 $\rightarrow 0.07$ 、 $\rightarrow 0.08$ と大きくすることにより、可変抵抗器 $11 (R_L)$ (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{34} の値を 0.08 、 $\rightarrow 0.07$ 、 $\rightarrow 0.06$ 、 $\rightarrow 0.05$ と小さくすることにより、

負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0094] また、図10(B)の逆相共振モードの測定結果においても同様に、結合係数 k_{34} の値を0.05に設定した場合、可変抵抗器11(R_L)の値を51 Ω →100 Ω 、→270 Ω 、→500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、43.9 Ω 、→45.6 Ω 、→46.8 Ω 、→47.1 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11(R_L)の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、47.1−43.9=3.2 Ω である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.06に設定した場合、可変抵抗器11(R_L)の値を51 Ω →100 Ω 、→270 Ω 、→500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、41.0 Ω 、→43.7 Ω 、→45.7 Ω 、→46.2 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11(R_L)の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、46.2−41.0=5.2 Ω である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.07に設定した場合、可変抵抗器11(R_L)の値を51 Ω →100 Ω 、→270 Ω 、→500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、39.4 Ω 、→41.2 Ω 、→44.6 Ω 、→45.1 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11(R_L)の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、45.1−39.4=5.7 Ω である。

また、結合係数 k_{34} の値を0.08に設定した場合、可変抵抗器11(R_L)の値を51 Ω →100 Ω 、→270 Ω 、→500 Ω の順に大きくしていくと、無線電力伝送装置1の入力インピーダンス Z_{in} の値は、32.1 Ω 、→34.2 Ω 、→37.8 Ω 、→38.7 Ω という具合に上昇した。この場合、可変抵抗器11(R_L)の値が51 Ω から500 Ω に上昇した場合の入力インピーダンス Z_{in} の変化量は、38.7−32.1=6.6 Ω である。

。

上記のように、逆相共振モードにおいても、結合係数 k_{34} の値を 0.05、
→ 0.06、→ 0.07、→ 0.08 と大きくすることにより、可変
抵抗器 11 (R_1) (被給電機器の負荷インピーダンス) の変化量に対する無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量である負荷変動応答性は高くなる傾向にあることが分かる。また、逆に、結合係数 k_{34} の値を 0.08、→ 0.07、→ 0.06、→ 0.05 と小さくすることにより、負荷変動応答性は小さくなる傾向にあることが分かる。

[0095] 上記測定実験 1～6 によれば、給電コイル 21、給電共振器 22、受電共振器 32、及び、受電コイル 31 を備えた無線電力伝送装置 1 において、隣接するコイル間における結合係数、例えば、結合係数 k_{12} の値、または、結合係数 k_{34} の値を大きくすることにより負荷変動応答性を高くすることができ、結合係数 k_{12} の値、または、結合係数 k_{34} の値を小さくすることにより負荷変動応答性を小さくすることができることが分かる。

[0096] (結合係数の調整方法)

次に、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を調整するためのパラメータである結合係数 k_{12} 、及び、 k_{34} の調整方法について説明する。

[0097] 一般的に、図 11 に示すように、無線電力伝送において、コイルとコイルとの間の距離と結合係数 k との関係は、コイルとコイルとの間の距離を縮める(短くする)と結合係数 k の値が高くなる傾向がある。これを本実施形態に係る無線電力伝送装置 1 に当てはめると、給電コイル 21 と給電共振器 22 との間の距離 d_{12} 、給電共振器 22 と受電共振器 32 との間の距離 d_{23} 、受電共振器 32 と受電コイル 31 との間の距離 d_{34} をそれぞれ縮めることによって、給電コイル 21 (コイル L_1) と給電共振器 22 (コイル L_2) との間の結合係数 k_{12} 、給電共振器 22 (コイル L_2) と受電共振器 32 (コイル L_3) との間の結合係数 k_{23} 、受電共振器 32 (コイル L_3) と受電コイル 31 (コイル L_4) との間の結合係数 k_{34} を高めることができる。逆に、給電コイ

ル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} 、給電共振器 2 2 と受電共振器 3 2 との間の距離 d_{23} 、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} をそれぞれ伸ばすことによって、給電コイル 2 1 (コイル L_1) と給電共振器 2 2 (コイル L_2) との間の結合係数 k_{12} 、給電共振器 2 2 (コイル L_2) と受電共振器 3 2 (コイル L_3) との間の結合係数 k_{23} 、受電共振器 3 2 (コイル L_3) と受電コイル 3 1 (コイル L_4) との間の結合係数 k_{34} を低めることができる。

[0098] 上記結合係数の調整方法、及び、結合係数の変化による入力インピーダンス Z_{in} の変化の測定実験より、給電共振器 2 2 と受電共振器 3 2 との間の距離 d_{23} 、及び、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} を固定した場合、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} を短くすることにより、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間における結合係数 k_{12} の値を大きくし、結合係数 k_{12} の値を大きくすることにより、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を高くすることができる。逆に、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} を長くすることにより、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間における結合係数 k_{12} の値を小さくし、結合係数 k_{12} の値を小さくすることにより、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を小さくすることができる。

[0099] また、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} 、及び、給電共振器 2 2 と受電共振器 3 2 との間の距離 d_{23} を固定した場合、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} を短くすることにより、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間における結合係数 k_{34} の値を大きくし、結合係数 k_{34} の値を大きくすることにより、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を高くすることができる。逆に、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} を長くすることにより、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間における結合係数 k_{34} の値を小さくし、結合係数 k_{34} の値を小さくすることにより、無線電力伝送装置 1 における入力インピ

ーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を小さくすることができる。

[0100] そして、負荷変動応答性を高くすることができれば、被給電機器における負荷インピーダンス Z_L の変化に対する、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量を大きくすることができるため、例えば、被給電機器における負荷インピーダンス Z_L が上昇した際には、被給電機器における負荷インピーダンス Z_L の上昇に追従して無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値を大きく上げることができ、その際に供給される電力を低減することができる（消費電力量を低減することができる）。一方、負荷変動応答性を小さくすることができれば、被給電機器における負荷インピーダンス Z_L の変化に対する、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値の変化量を小さくすることができるため、被給電機器における負荷インピーダンス Z_L が変化したとしても、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の値を維持することができ、その際に供給される電力を維持することができる。

[0101] また、上記では、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} 、給電共振器 2 2 と受電共振器 3 2 との間の距離 d_{23} 、及び、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} を物理的に変化させるという簡易な作業により、それぞれのコイル間の結合係数の値を変えることができる。即ち、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} 、又は、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} を物理的に変化させるという簡易な作業によって、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を調整することが可能となる。

[0102] 更に、上記方法によれば、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性の調整を、インピーダンス調整器などの新たな機器を設けずに実現することができる。即ち、無線電力伝送装置 1 の部品点数を増やさずに、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を調整することが可能となる。

[0103] なお、上記では、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を調整する結合係数 k_{12} 、 k_{34} の調整方法として、給電コイル 2

1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} 、及び、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} をそれぞれ変化させる方法を例示して説明した。しかし、結合係数 k_{12} 、 k_{34} の調整方法としては、これに限らず、給電共振器 2 2 の中心軸と受電共振器 3 2 の中心軸をずらす方法や、給電共振器 2 2 のコイル面と受電共振器 3 2 のコイル面に角度をつける方法や、給電コイル 2 1 ・給電共振器 2 2 や受電共振器 3 2 ・受電コイル 3 1 などの各素子（抵抗、コンデンサ、コイル）の容量を変化させる方法や、給電モジュール 2 に供給する交流電力の駆動周波数を変える方法などが挙げられる。

[0104] （製造方法）

次に、無線電力伝送装置 1 を製造する一工程である、設計方法（設計工程）について、図 1 2 及び図 1 3 を参照して説明する。本説明では、無線電力伝送装置 1 を搭載する携帯機器としてイヤホンスピーカ部 2 0 0 a を備えた無線式ヘッドセット 2 0 0、及び、充電器 2 0 1 を例にして説明する（図 1 2 参照）。

[0105] 本設計方法で設計される無線電力伝送装置 1 は、図 1 2 に示す無線式ヘッドセット 2 0 0 及び充電器 2 0 1 に、それぞれ受電モジュール 3（受電コイル 3 1 ・受電共振器 3 2）及び給電モジュール 2（給電コイル 2 1 ・給電共振器 2 2）として搭載されている。また、図 1 2 では、説明の都合上、安定回路 7、充電回路 8 及びリチウムイオン二次電池 9 を受電モジュール 3 の外に記載しているが、実際は、ソレノイド状の受電コイル 3 1 及び受電共振器 3 2 のコイル内周側に配置されている。即ち、無線式ヘッドセット 2 0 0 には、受電モジュール 3、安定回路 7、充電回路 8 及びリチウムイオン二次電池 9 が搭載されており、充電器 2 0 1 には、給電モジュール 2 が搭載されており、給電モジュール 2 の給電コイル 2 1 に交流電源 6 が接続された状態で使用される。

[0106] （設計方法）

まず、図 1 3 に示すように、リチウムイオン二次電池 9 の容量、及び、リチウムイオン二次電池 9 の充電に必要とされる充電電流から、受電モジュール

ル 3 が受電する受電電力量が決まる (S 1)。

[0107] 次に、給電モジュール 2 と受電モジュール 3 との間の距離を決定する (S 2)。これは、受電モジュール 3 を内蔵した無線式ヘッドセット 200 を、給電モジュール 2 を内蔵した充電器 201 に載置した際の給電共振器 22 と受電共振器 32 との間の距離 d_{23} であり、使用形態としては充電中の状態である。より詳細には、給電共振器 22 と受電共振器 32 との間の距離 d_{23} は、無線式ヘッドセット 200 と充電器 201 の形状・構造を考慮して決定される。

[0108] また、無線式ヘッドセット 200 の大きさ・形状・構造を踏まえて、受電モジュール 3 における受電コイル 31 及び受電共振器 32 のコイル径が決定される (S 3)。

[0109] また、充電器 201 の大きさ・形状・構造を踏まえて、給電モジュール 2 における給電コイル 21 及び給電共振器 22 のコイル径が決定される (S 4)。

[0110] 上記 S 2 ~ S 4 の手順を経ることにより、無線電力伝送装置 1 の給電共振器 22 (コイル L_2) と受電共振器 32 (コイル L_3) との間の結合係数 k_{23} と、電力伝送効率が決まることになる。

[0111] 上記 S 1 で決定した受電モジュール 3 が受電する受電電力量、及び、S 2 ~ S 4 の手順を経て決定された電力伝送効率より、給電モジュール 2 に給電する必要最低限の給電電力量が決定される (S 5)。

[0112] そして、上記受電モジュール 3 が受電する受電電力量、電力伝送効率、及び、給電モジュール 2 に給電する必要最低限の給電電力量を踏まえて、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の設計値が決まる (S 6)。

[0113] そして、S 6 で決定された入力インピーダンス Z_{in} 及び入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を有するように、給電コイル 21 と給電共振器 22 との間の距離 d_{12} 、及び、受電共振器 32 と受電コイル 31 との間の距離 d_{34} が決められる (S 7)。具体的には、給電共振器 22 と受電共振器 32 との間の距離 d_{23} 、及び、受電共振器 32 と受電コイル 31 との間の距離 d

3 4 を固定した場合、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} を短くすることにより、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性が高くなる特性に基づき調整をしたり、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} 、及び、給電共振器 2 2 と受電共振器 3 2 との間の距離 d_{23} を固定した場合、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} を短くすることにより、無線電力伝送装置 1 の入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性が高くなる特性に基づき調整をしたりすることにより、S 6 で決定された入力インピーダンス Z_{in} 及び入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性になるような、給電コイル 2 1 と給電共振器 2 2 との間の距離 d_{12} 、及び、受電共振器 3 2 と受電コイル 3 1 との間の距離 d_{34} が決定される。

[0114] 上記設計方法を含む無線電力伝送装置 1 の製造方法、及び、上記設計工程を経て製造された無線電力伝送装置 1 によれば、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性の調整を、新たな機器を設けずにできる無線電力伝送装置 1 を製造することができる。即ち、無線電力伝送装置 1 の部品点数を増やさずに、無線電力伝送装置 1 における入力インピーダンス Z_{in} の負荷変動応答性を調整することが可能となる。

[0115] (その他の実施形態)

上記製造方法の説明では、無線式ヘッドセット 2 0 0 を例示して説明したが、充電池を備えた機器であれば、タブレット型 P C、デジタルカメラ、携帯電話、イヤホン型音楽プレイヤー、補聴器、集音器などにも使用することができる。

[0116] また、上記説明では、給電モジュール 2 及び受電モジュール 3 が備える共振器（コイル）間の共振現象（磁界共鳴状態）を利用して磁場を結合させることにより電力伝送を行う無線電力伝送装置 1 を例示して説明したが、コイル間の電磁誘導を利用して電力伝送を行う無線電力伝送装置 1 においても適用可能である。

[0117] また、上記説明では、無線電力伝送装置 1 を携帯型の電子機器に搭載した

場合を想定して説明したが、用途はこれら小型なものに限らず、必要電力量に合わせて仕様を変更することにより、例えば、比較的大型な電気自動車（EV）における無線充電システムや、より小型な医療用の無線式胃カメラなどにも搭載することができる。

[0118] 以上の詳細な説明では、本発明をより容易に理解できるように、特徴的部分を中心に説明したが、本発明は、以上の詳細な説明に記載する実施形態・実施例に限定されず、その他の実施形態・実施例にも適用することができ、その適用範囲は可能な限り広く解釈されるべきである。また、本明細書において用いた用語及び語法は、本発明を的確に説明するために用いたものであり、本発明の解釈を制限するために用いたものではない。また、当業者であれば、本明細書に記載された発明の概念から、本発明の概念に含まれる他の構成、システム、方法等を推考することは容易であると思われる。従って、請求の範囲の記載は、本発明の技術的思想を逸脱しない範囲で均等な構成を含むものであるとみなされるべきである。また、本発明の目的及び本発明の効果を十分に理解するために、すでに開示されている文献等を十分に参酌することが望まれる。

符号の説明

- [0119]
- 1 無線電力伝送装置
 - 2 給電モジュール
 - 3 受電モジュール
 - 6 交流電源
 - 7 安定回路
 - 8 充電回路
 - 9 リチウムイオン二次電池
 - 21 給電コイル
 - 22 給電共振器
 - 31 受電コイル
 - 32 受電共振器

2 0 0 無線式ヘッドセット

2 0 1 充電器

請求の範囲

[請求項1] 給電モジュールから、電力を消費する被給電機器が接続された受電モジュールに対して磁界を変化させて電力を供給する無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、

前記給電モジュール、及び、受電モジュールはそれぞれ少なくとも1つのコイルを有し、

隣接する前記コイル間における結合係数の値をそれぞれ調整することにより、前記被給電機器の負荷インピーダンスの単位変化量に対する当該無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量である負荷変動応答性を調整することを特徴とする無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法。

[請求項2] 少なくとも給電コイル及び給電共振器を備えた給電モジュールから、少なくとも受電共振器及び受電コイルを備え、電力を消費する被給電機器が接続された受電モジュールに対して共振現象によって電力を供給する無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法であって、

前記給電コイルと前記給電共振器との間における結合係数 k_{12} 、前記給電共振器と前記受電共振器との間における結合係数 k_{23} 、及び、前記受電共振器と前記受電コイルとの間における結合係数 k_{34} の値の少なくとも1つを調整することにより、前記負荷変動応答性を調整することを特徴とする請求項1に記載の無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法。

[請求項3] 前記各結合係数 k_{12} 、 k_{23} 、 k_{34} の値は、それぞれ前記給電コイルと前記給電共振器との間の距離、前記給電共振器と前記受電共振器との間の距離、及び、前記受電共振器と前記受電コイルとの間の距離の少なくとも1つを変化させることにより調整されることを特徴とする請求項2に記載の無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷

変動応答性の調整方法。

[請求項4] 前記給電共振器と前記受電共振器との間の距離、及び、前記受電共振器と前記受電コイルとの間の距離を固定した場合、

前記負荷変動応答性は、

前記給電コイルと前記給電共振器との間の距離を短くするにつれて、前記給電コイルと前記給電共振器との間における前記結合係数 k_{12} の値が大きくなり、前記結合係数 k_{12} の値が大きくなるにつれて、当該無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性が高くなる特性に基づいて調整されることを特徴とする請求項3に記載の無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法。

[請求項5] 前記給電コイルと前記給電共振器との間の距離、及び、前記給電共振器と前記受電共振器との間の距離を固定した場合、

前記負荷変動応答性は、

前記受電共振器と前記受電コイルとの間の距離を短くするにつれて、前記受電共振器と前記受電コイルとの間における前記結合係数 k_{34} の値が大きくなり、前記結合係数 k_{34} の値が大きくなるにつれて、当該無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性が高くなる特性に基づいて調整されることを特徴とする請求項3に記載の無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法。

[請求項6] 前記給電モジュールに供給する電力の駆動周波数に対する伝送特性の値が、前記給電モジュール及び受電モジュールにおける共振周波数よりも低い駆動周波数帯域及び前記共振周波数よりも高い駆動周波数帯域にそれぞれピークを有するように設定し、

前記給電モジュールに供給する電力の前記駆動周波数は、前記共振周波数よりも低い駆動周波数帯域に現れる伝送特性のピーク値に対応する帯域であることを特徴とする請求項2～5の何れかに記載の無線

電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法。

[請求項7] 前記給電モジュールに供給する電力の駆動周波数に対する伝送特性の値が、前記給電モジュール及び受電モジュールにおける共振周波数よりも低い駆動周波数帯域及び前記共振周波数よりも高い駆動周波数帯域にそれぞれピークを有するように設定し、

前記給電モジュールに供給する電力の前記駆動周波数は、前記共振周波数よりも高い駆動周波数帯域に現れる伝送特性のピーク値に対応する帯域であることを特徴とする請求項2～5の何れかに記載の無線電力伝送装置における入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法。

[請求項8] 請求項1～5のいずれかに記載の入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法により調整されたことを特徴とする無線電力伝送装置。

[請求項9] 請求項6に記載の入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法により調整されたことを特徴とする無線電力伝送装置。

[請求項10] 請求項7に記載の入力インピーダンスの負荷変動応答性の調整方法により調整されたことを特徴とする無線電力伝送装置。

[請求項11] 給電モジュールから、電力を消費する被給電機器が接続された受電モジュールに対して磁界を変化させて電力を供給する無線電力伝送装置の製造方法であって、

前記給電モジュール、及び、受電モジュールにそれぞれ少なくとも1つのコイルを設け、

隣接する前記コイル間における結合係数の値をそれぞれ調整することにより、前記被給電機器の負荷インピーダンスの単位変化量に対する当該無線電力伝送装置の入力インピーダンスの値の変化量である負荷変動応答性を調整する工程を含むことを特徴とする無線電力伝送装置の製造方法。