

複数ワイヤレス電力伝送におけるバンドリジェクトフィルタの 検討とワイヤレスモータへの応用

伊藤 勇渡* 居村 岳広 堀 洋一（東京理科大学）

Examination of Band-Reject Filter in Multiple Wireless Power Transfer and Application to Wireless Motor

Yuto Ito*, Takehiro Imura, Yoichi Hori (Tokyo University of Science)

In recent years, a power transmission method called wireless power transfer (WPT) has been actively studied. At WPT, when a plurality of power transmitting coils and power receiving coils are used, if the power receiving coils are brought close to each other, power is transmitted to a coil that should not originally transmit power. Therefore, I propose a circuit configuration using a band reject filter. In addition, a comparison with a bandpass filter is also performed.

キーワード：ワイヤレス電力伝送(WPT), バンドパスフィルタ(BPF), バンドリジェクトフィルタ(BRF), DC モータ, ワイヤレスモータ

(wireless power transfer(WPT), band-pass filter(BPF), band-reject filter(BRF), DC Motor, Wireless Motor)

1. 序論

近年、ワイヤレス電力伝送(WPT)と呼ばれる方式が普及し、盛んに研究が進められてきている。これは電磁誘導やマイクロ波を用いて離れた場所に電源を介さずに給電する方式である。磁界共振結合方式を用いた WPT ではコイル間距離を十分広げた状態で大電力、高効率な電力伝送が可能であり、位置ずれにも強い。この WPT が用いられる理由として、磁気的な結合による電力伝送方式であることから埋め込み式でアクセスできない電子機器へ電力伝送することができる点⁽²⁾や、受電コイルを複数用意することで簡単に複数の回路に電力を供給できるという点⁽³⁾がある。

この利点のうち複数給電について着目した。先行研究⁽⁴⁾では送電コイル 1 つに対して受電コイル 3 つ用意し、受電コイルのそれぞれの共振周波数を変えて回路を組んでいる。送電側の共振周波数及び電源の周波数を変化させることで、対応する受電コイルへの選択的な電力伝送を可能であることを示している。この手法では任意の周波数において対応しているモータを回転させるのを目的としているが、完全に独立して制御が出来ておらず、別の共振周波数でもほかのモータが回ってしまうという問題がある。

本研究では、この選択的な電力伝送による独立制御が出来ないという問題を解決するためにバンドリジェクトフィルタ(BRF)を提案する。同様のフィルタ回路にバンドパスフィルタ(BPF)があり kHz 帯で主に用いられている⁽⁵⁾。一方

で、BRF は主にマイクロ波などの GHz 帯に用いられており⁽⁶⁾kHz 帯では用いて制御を行うという研究例は少ない。そこで、共振コンデンサを用いた磁界共振結合による WPT において、1 つの送電側に対して、コイルとコンデンサを用いた BPF 及び BRF を組み込んだ複数の受電側への WPT を行う。この提案ではフィルタによる選択的な電力伝送が可能であるため、送受電間での相互通信が必要ない。受電側に接続する抵抗負荷にかかる電力、及び応用事例の 1 つとしてワイヤレスモータを取り上げ、その回転数を計測することで BPF, BRF の比較を行い、シミュレーション及び実験によって提案手法の有用性を示す。

2. 原理

〈2・1〉 WPT の概要 本研究では送電側コイル、受電側コイルそれぞれに対して共振コンデンサを直列に組んだ S-S (Series-Series) 方式を採用した。

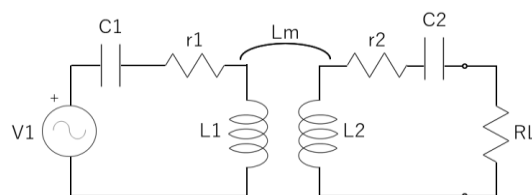


図 1 S-S 回路

Fig.1 S-S circuit

送受電回路において共振周波数は同じとすると(1)式が成り立つ。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1)$$

この共振条件を用いることで位置ずれに強く、大電力で高効率、大エアギャップを達成することができる。

〈2・2〉 BPF の周波数特性 本研究で用いた BPF 回路は抵抗、コイル、コンデンサを直列に組んだ回路である。

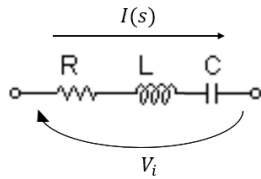


図 2 RLC 直列回路
Fig.2 RLC series circuit

図 2 のようにパラメータを定義すると、端子間電圧 V_i は(2)式のようになり、伝達関数は(3)式になる。

$$V_i = \left(R + Ls + \frac{1}{Cs} \right) I(s) \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{I}{V_i} = \frac{\frac{1}{L}s}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (3)$$

伝達関数より BPF の周波数特性は図 3 のようになる。ここでコイルとコンデンサによる共振周波数は 100 kHz とした。

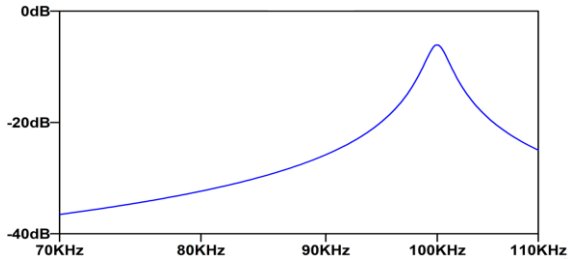


図 3 BPF の周波数特性
Fig.3 BPF characteristic

〈2・3〉 BRF の周波数特性 本研究で用いた BRF 回路はコイルとコンデンサを直列にし、抵抗に対して並列に組んだ回路である。

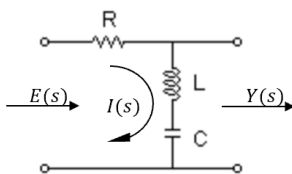


図 4 RLC 並列回路
Fig.4 RLC parallel circuit

図 4 のようにパラメータを定義すると伝達関数 $G(s)$ は(4)(5)式を用いて(6)式のように求められる。

$$E(s) = RI(s) + LsI(s) + \frac{1}{Cs}I(s) \quad (4)$$

$$Y(s) = LsI(s) + \frac{1}{Cs}I(s) \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (6)$$

伝達関数より BRF の周波数特性は図 5 のようになる。BPF 同様、共振周波数は 100 kHz とした。

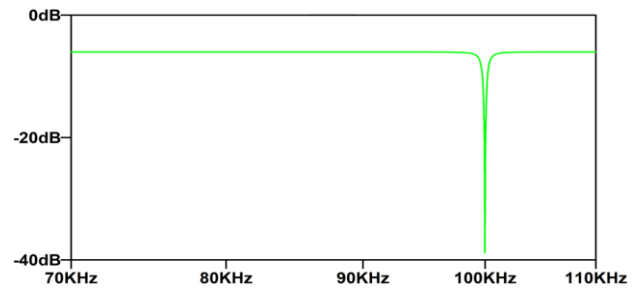


図 5 BRF の周波数特性
Fig.5 BRF characteristic

次節以降ではこれら BPF, BRF 及びフィルタを用いていない回路(No filter :NF)を用いてシミュレーション及び実験を行うことで 3 回路の比較を行う。

3. 2つの周波数帯におけるフィルタ回路

〈3・1〉 シミュレーションによる回路検討 LTspice を用いてシミュレーションを行った。表 1 及び図 6 に回路及びパラメータを、図 7 に BRF(図 6(a))における周波数特性を示す。BPF(図 6(b))は図 3 の周波数特性を 2 つ合わせたものと同じであるためここでは省略する。また、この回路及びパラメータはシミュレーションと実験で同様の値である。

表 1 2つの周波数帯における素子値

Table 1 Element value in two frequency bands

Ls[μH]	192.4	Cs1[nF]	13.11
Lp1[μH]	49.91	Cs2[nF]	5.787
Lp2[μH]	49.9	Cp1[nF]	50.65
Lf1[μH]	146.5	Cp2[nF]	22.35
Lf2[μH]	122.7	Cf1[nF]	17.3
RL100[Ω]	14.86	Cf2[nF]	9.17
RL150[Ω]	14.82	C[μF]	100

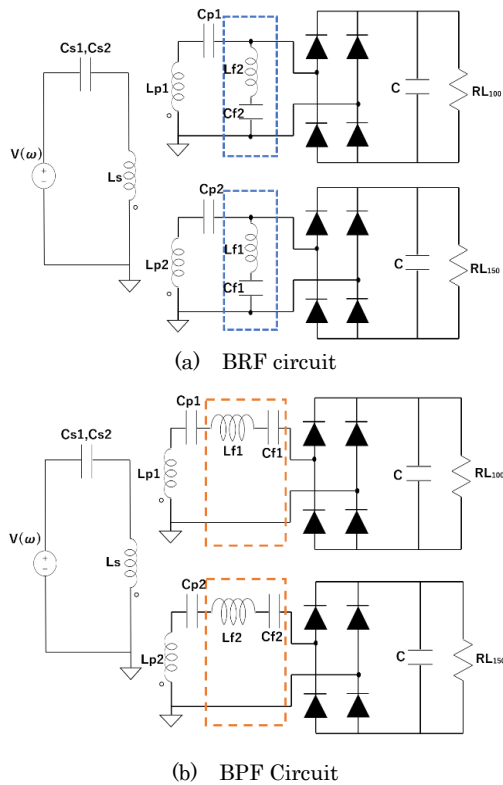


図 6 2つの周波数帯における WPT 回路
Fig.6 WPT circuits in two frequency bands

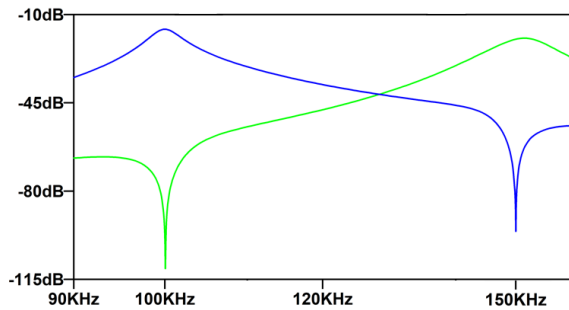


図 7 2つの周波数帯における BRF の周波数特性
Fig.7 BRF characteristic in two frequency bands

2つの周波数におけるフィルタ回路によるシミュレーション及び実験では共振周波数を 100 kHz, 150 kHzとした。図 6(a)の青で囲まれた部分が BRF, (b)のオレンジで囲まれた部分が BPF の役割を果たしている。図 7 より任意の共振周波数において電力を送送し、もう一方の回路への伝送を遮断していることが確認できる。また、これらフィルタを取り除いた回路を NF としている。NF, BPF, BRF の 3 回路において周波数を 100 kHz, 150 kHz と変化させたときの受電側の抵抗負荷にかかる電力のシミュレーション結果を以下の図 8, 9 に示す。ここで本研究では電力を抑制する側を非選択側、抑制しない方向を選択側と表現する。

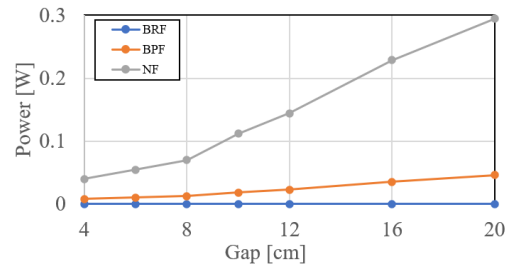


図 8 150 kHz における非選択側のシミュレーション結果
Fig.8 Non-selected side for 150 kHz for simulation

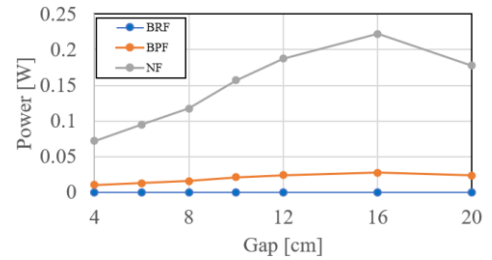
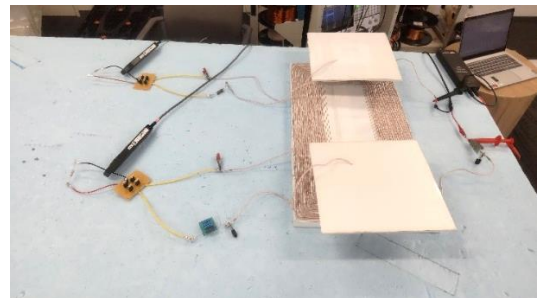


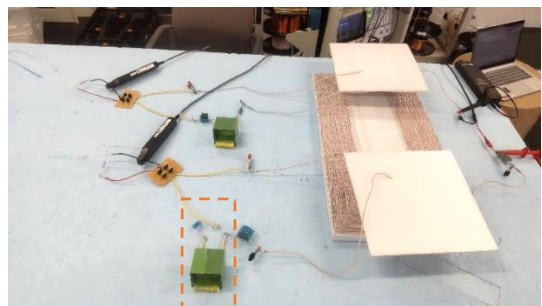
図 9 100 kHz における非選択側のシミュレーション結果
Fig.9 Non-selected side for 100 kHz for simulation

以上の結果から BRF を用いた回路において、抵抗負荷にかかる電力が 0 W となり電力が遮断できていることが確認できた。 $k = 0.1$ (本研究においてはギャップ 8 cm) の時を例にとると、NF に対して BPF はおよそ 80 %減少したのに対し BRF はおよそ 100 %減少することができた。

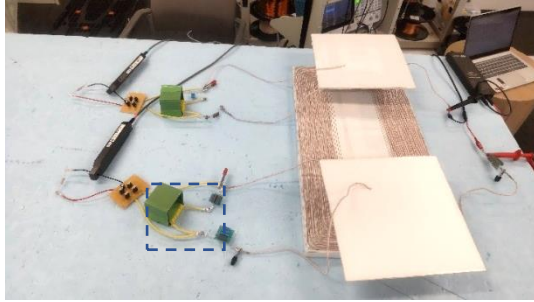
〈3・2〉 2つの周波数帯における実験 シミュレーションと同様の回路を組み実験を行った。実験回路を図 10 に示す。



(a) NF Circuit



(b) BPF Circuit



(c) BRF Circuit

図 10 2つの周波数帯における実験回路

Fig.10 Experiment circuit in two frequency bands

複数の受電コイルを用いた実験を行う際に留意する点として受電コイル同士の結合によって生じるクロスカップリング（飛び越し結合）がある。このクロスカップリングの有無によって周波数特性の変化に影響を及ぼしてしまい、共振周波数ずれや効率の低下につながってしまう恐れがある。クロスカップリングを考慮したうえで最大効率を実現する回路構成などはあるが⁽⁷⁾、本研究ではそれを考慮した回路の作成は必要ないと考える。送電コイルに対して受電コイルのサイズを小さくし、受電コイルの距離を十分離すことでクロスカップリングの影響を無視できる。この実験回路における結果を図 11, 12 に示す。

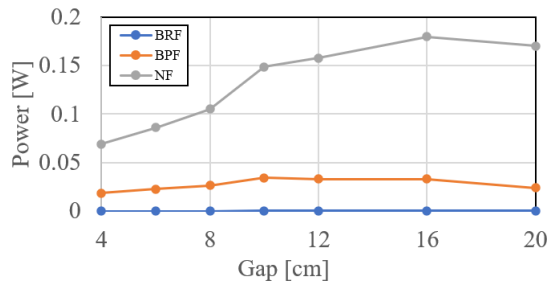


図 11 150 kHz における非選択側の実験結果

Fig.11 Non-selected side for 150 kHz in examination

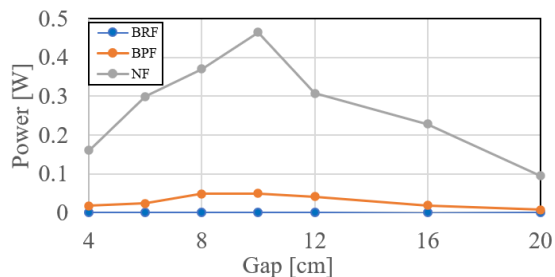


図 12 100 kHz における非選択側の実験結果

Fig.12 Non-selected side for 100 kHz in examination

実験結果においてもシミュレーション結果同様 BRF において抵抗負荷にかかる電力が 0 W となり電力が遮断できてお

り有用性が確認できた。シミュレーション同様 $k = 0.1$ の時を例にとると、NF に対して BPF はおよそ 75 % 減少したのに対し、BRF はおよそ 99.9 % 減少することができた。以上シミュレーション及び実験によって BRF の有用性を明らかにすることができた。

最後に選択対象の周波数において受電コイルに接続された抵抗負荷にかかる電力について図 13, 14 にまとめる。

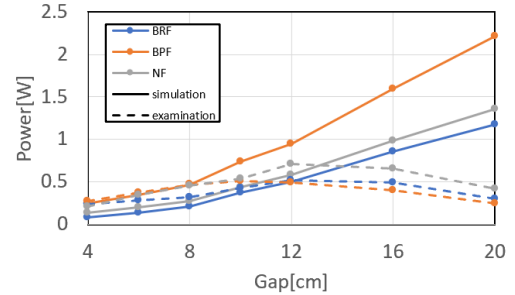


図 13 150 kHz における選択側のシミュレーション及び実験結果

Fig.13 Selected side for 150 kHz in examination and simulation

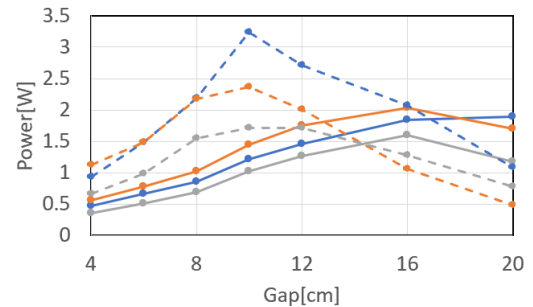


図 14 100 kHz における選択側のシミュレーション及び実験結果

Fig.14 Selected side for 100 kHz in examination and simulation

以上の結果よりフィルタの有無によって出力電力に大きな影響を与えることなく、目的の周波数においてのみ抑制することができることが確認できた。このことから BRF の有用性が明らかにできたと考えられる。

4. 3つの周波数帯におけるフィルタ回路

次に受電コイルを 3 つにした 3 つの周波数帯におけるフィルタ回路について述べる。回路構成、周波数特性およびパラメータを図 15, 16 及び表 2 に示す。回路構成に関しては NF ではフィルタを除いた回路、BPF ではコイルとコンデンサを直列に組んだものを受電側に挿入した回路であり前章で述べた回路とほぼ同じであるため、BRF についてのみ記載する。周波数特性に関しても図 7 同様、図 3 のような

特性であるため BRF のみの記載とする。また、共振周波数は 50 kHz、75 kHz、100 kHz とし、BPF においてはその共振周波数にあった素子値である L_{f1} 、 L_{f3} 、 L_{f5} 、 C_{f1} 、 C_{f3} 、 C_{f5} を用いて回路を作成した。

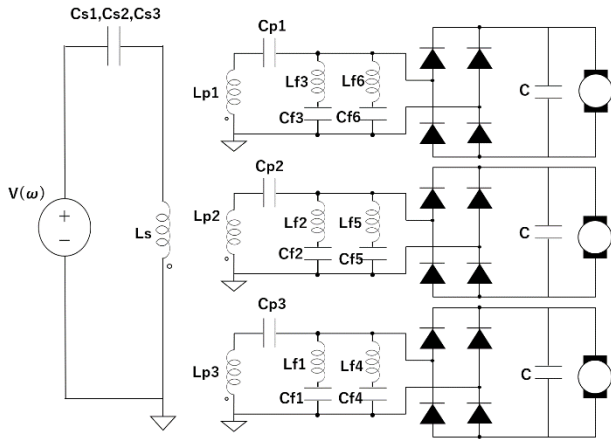


図 15 3つの周波数帯における BRF 回路

Fig.15 BRF circuits in three frequency bands

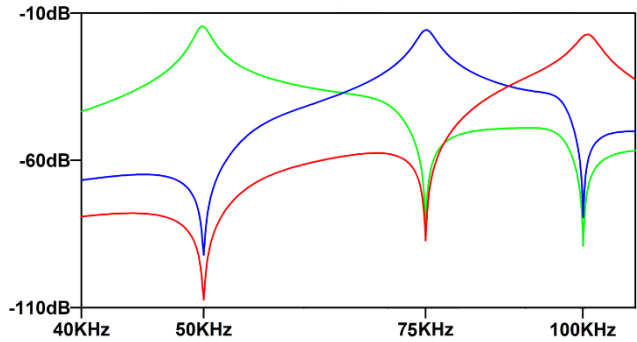


図 16 3つの周波数帯における BRF の周波数特性

Fig.16 BRF characteristic in three frequency bands

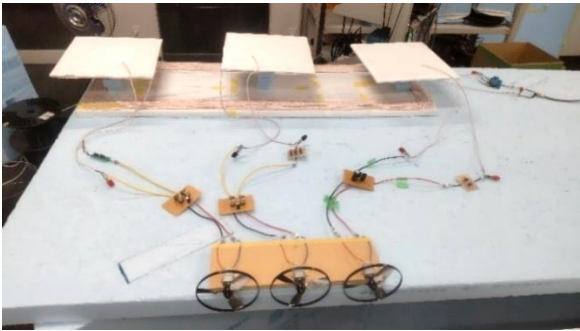
表 2 3つの周波数帯における素子値

Table 2 Element value in three frequency bands

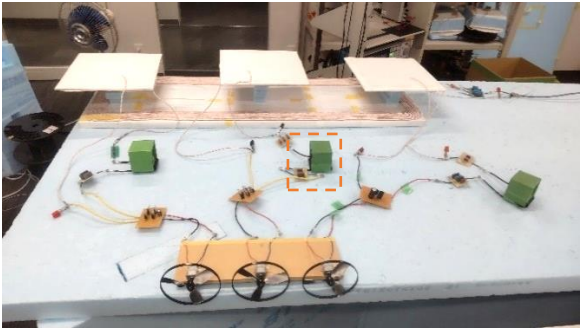
$L_s[\mu\text{H}]$	295.3	$C_{s1}[\text{nF}]$	8.599
$L_{p1}[\mu\text{H}]$	49.99	$C_{s2}[\text{nF}]$	15.27
$L_{p2}[\mu\text{H}]$	51.15	$C_{s3}[\text{nF}]$	34.28
$L_{p3}[\mu\text{H}]$	50.84	$C_{p1}[\text{nF}]$	49.93
$L_{f1}[\mu\text{H}]$	125.5	$C_{p2}[\text{nF}]$	88.08
$L_{f2}[\mu\text{H}]$	167.4	$C_{p3}[\text{nF}]$	199
$L_{f3}[\mu\text{H}]$	158.5	$C_{f1}[\text{nF}]$	80.36
$L_{f4}[\mu\text{H}]$	180.8	$C_{f2}[\text{nF}]$	60.07
$L_{f5}[\mu\text{H}]$	67.16	$C_{f3}[\text{nF}]$	28.67
$L_{f6}[\mu\text{H}]$	61.99	$C_{f4}[\text{nF}]$	24.98
$C[\mu\text{F}]$	100	$C_{f5}[\text{nF}]$	37.4
		$C_{f6}[\text{nF}]$	41.12

図 16 より任意の共振周波数において電力を伝送している回路は 1 つであり、それ以外の 2 つの回路への伝送を遮断し

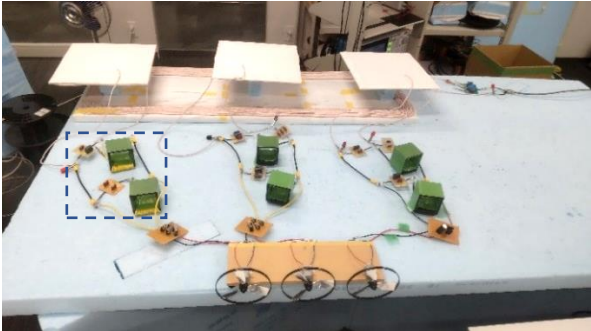
ていることが確認できる。実験回路において、2つの周波数帯における実験で抵抗負荷を接続していた場所に DC モータ(motor1~3)を取り付けた。入力電圧を 6 V とし、時間によって送電側の共振周波数を変化させることで、対応する受電コイルに対して電力伝送を行っており、それぞれの受電コイルに接続された DC モータの回転数を計測した。0~30 s では送電側の周波数を 50 kHz とし motor1 を回す。31~60 s では周波数を 75 kHz に切り替え、motor2 を回す。同様に 61~90 s では周波数を 100 kHz に切り替え、motor3 を回す。実験回路について図 17 に、これら実験回路を用いた結果を図 18~20 に示す。



(a) NF circuit



(b) BPF circuit



(c) BRF circuit

図 17 3つの周波数帯における実験回路

Fig.17 Experiment circuit in three frequency bands

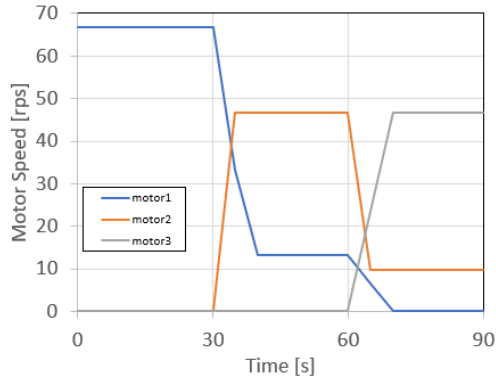


図 18 NF におけるモータの回転数

Fig.18 Motor speed in NF

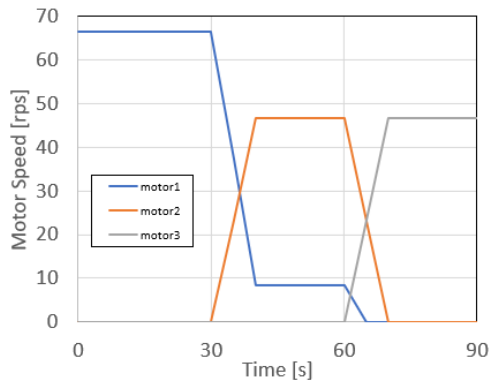


図 19 BPF におけるモータの回転数

Fig.19 Motor speed in BPF

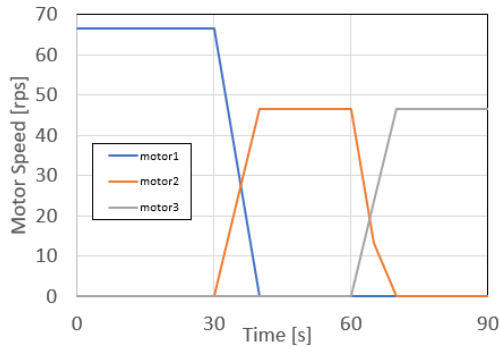


図 20 BRF におけるモータの回転数

Fig.20 Motor speed in BRF

図 18, 19 の NF 及び BPF では 75 kHz において motor1 も回ってしまっていることが確認できる。一方で図 20 より BRF では送電側と同じ共振周波数を持った DC モータのみが回転していることが確認できる。このことから BRF が周波数の選択的な電力伝送に適していることがわかる。今回の実験で用いた DC モータは適正電圧が 1.5 V であったため、さらに大きな適正電圧を持ったモータを用いればさらに顕著に結果が表れると考えられる。

5. 結論

本研究では複数のコイルを持った WPT において NF, BPF, BRF の 3 回路を作成し、受電側に繋がれた抵抗負荷の電力や DC モータの回転数を計測することで提案手法の有用性について検証した。2 つの周波数帯を用いたシミュレーションにおける非選択側の周波数における出力電力の減少率はシミュレーションでは NF に対して BPF は約 80 % 減少したのに対し BRF では約 100 % 減少したのに対し、実験では BPF が約 75 % の減少に対し、BRF では約 99.9 % 減少できたことを確認した。また 3 つの周波数帯においては受電側に DC モータを繋ぎ、BRF のみが独立制御可能であることを確認した。これら 2 つの実験及びシミュレーションによって選択的な電力伝送における BRF の有用性を明らかにすることができた。

文 献

- (1) André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher and Marin Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", Science, Vol. 317, no. 5834, p.83-86, 6.July. 2007.
- (2) RamRakhyani, A.K.; Mirabbasi, S.; Chiao, M. Design and optimization of resonancebased efficient wireless power delivery systems for biomedical implants. IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst. 2011, 5, 48–63.
- (3) Chaoqiang Jiang, K. T. Chau, T. W. Ching, Chunhua Liu, Wei Han, "Time-Division Multiplexing Wireless Power Transfer for Separately Excited DC Motor Drives", IEEE Trans. Magn., Vol.53, No.11. 2017.
- (4) C. Jiang, K. T. Chau, C. Liu, and W. Han, "Wireless DC motor drives with selectability and controllability," Energies, vol. 10, no. 1. 2017.
- (5) D. Thenathayalan and J. Park, "Individually regulated multiple-output WPT system with a single PWM and single transformer," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 8, no. 4, pp. 3542–3557, Dec. 2020.
- (6) R. Keshavarz, Y. Miyana, M. Yamamoto, T. Hikage and N. Shariati, "MetamaterialInspired Quad-Band Notch Filter for LTE Band Receivers and WPT Applications," 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science,, pp. 1-4. 2020.
- (7) T. Imura, "Cross-coupling canceling method for wireless power transfer via magnetic resonance coupling", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 134, no. 5, pp. 564-574, 2014.