

# ATAC 回路を用いた磁界結合型ワイヤレス送電システムの 磁界高調波抑制技術

柳田 朋則<sup>†</sup> 町田 恒介<sup>†</sup> 浅見 幸司\* 圓道 祐樹\* 小林 春夫<sup>†</sup>

<sup>†</sup>群馬大学大学院 理工学府電子情報部門 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1

\*株式会社アドバンテスト

Harmonic suppression technique of magnetic field coupling type wireless power transmission system using ATAC circuit

Tomonori Yanagida<sup>†</sup>, Kosuke Machida<sup>†</sup>, Koji Asami\*, Yuki Endo\*, Haruo Kobayashi<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Electronics and Informatics Division, Gunma University, 1-5-1, Tenjin-cho, Kiryu, Gunma, 376-8515 Japan

\*Advantest Corporation

キーワード：磁界結合型ワイヤレス送電, ATAC 回路, 高調波抑制

(Keywords, wireless power transmission, magnetically coupled resonance, harmonics suppression)

## 1. はじめに

磁界結合型ワイヤレス送電システムは最大 90%の効率を持ちながら数 m ほどの伝送距離を確保でき、3次元的な移動自由度を持つ画期的な無線送電手法である。しかし送受信機の共振周波数を厳密に合わせる必要がある。また伝送効率を高めるため送受信機に Q 値が 100 以上の共振回路を作る必要がある。たとえば Q = 500 の共振回路を用いた送電では、送信機と受信機の共振周波数を 0.1%以内に調整する必要がある<sup>(1)</sup>。さらには効率化、簡易化のために電源を D 級アンプで構成する必要があるが、スイッチ制御による矩形信号の生成により送信磁界に高調波が乗ってしまう。これはラジオ等の電波機器に影響を与えてしまう。

本論文では、高 Q 共振回路で調整を行うことなく、設定された共振周波数を自動で維持できる ATAC (Automatic Tuning Assist Circuit) 回路を使用し磁界に発生する高調波を抑制する手法を提案する。

## 2. ATAC 回路の原理

### (2.1) 磁界結合型ワイヤレス送電システム

図 1 に示すように、磁界結合型ワイヤレス送電システムの等価回路は AC 電源と RLC 直列共振回路で構成される。Q 値と給電効率は以下の式で表すことができる。

$$Q_{TX} = \frac{\omega_0 L_{TX}}{R_{TX}}, \quad Q_{RX} = \frac{\omega_0 L_{RX}}{R_{RX}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{\kappa^2 Q_{TX} Q_{RX}} \left( \frac{R_L}{R_{RX}} + 1 \right) + 1 \right\} \left( 1 + \frac{R_{RX}}{R_L} \right)} \quad (2)$$

電送距離を大きくとればコイル間の結合係数 $\kappa$ が小さくなり、給電効率が落ちる。その分の Q 値を大きくする必要がある。

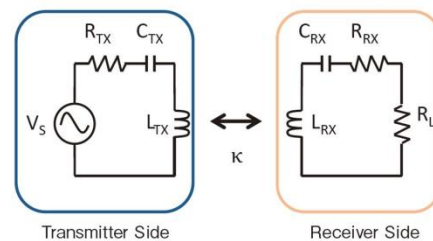


図 1. 磁界結合型ワイヤレス送電システムの等価回路

Fig.1 Equivalent circuit of magnetic field coupling type wireless power transmission system

ここで送信側の電源から見たインピーダンスは

$$Z_X = R_{TX} + j\omega L_{TX} + \frac{1}{j\omega C_{TX}} \quad (3)$$

電源と共振回路が共振状態のとき、リアクタンス成分は無視され、電圧と電流の位相が一致する。しかし、共振点がずれている場合、リアクタンスが現われ電圧と電流は位相差 $\phi$ を持つ(図 2)。

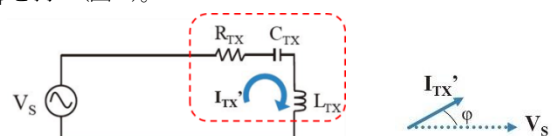


図 2. 主電源の電圧・電流位相

Fig.2 Voltage and current phase of main power supply

電源をハーフブリッジ D 級アンプに置き換えた磁界結合型ワイヤレス送電システムを図 3 に示す。スイッチングによりインダクタ電流  $I_{TX}$  に高調波が含まれ、磁界にも高調波が乗ってしまう。

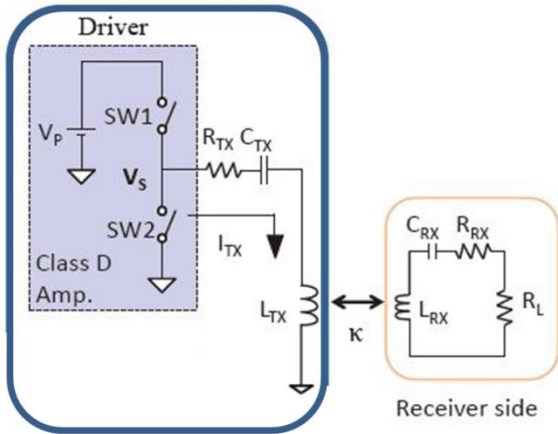


図 3. D 級アンプを使った磁界結合型送電システム

Fig.3 Magnetic field coupling type power transmission system using class D amplifier

$C_{TX}$  の値を振り、意図的に共振周波数をずらしたときの出力電流を図 4 に示す。シミュレーションパラメータは以下に示す。

$$C_{TX} = 126\text{pF}, 124\text{pF}, 122\text{pF}, 120\text{pF}, 117\text{pF}$$

$$V_p = 25\text{V}, \quad R_{TX} = 1\Omega, \quad L_{TX} = 200\mu\text{H},$$

$$L_{RX} = 200\mu\text{H}, \quad C_{RX} = 126\text{pF}, \quad R_{RX} = 0\Omega, \quad R_L = 1\Omega$$

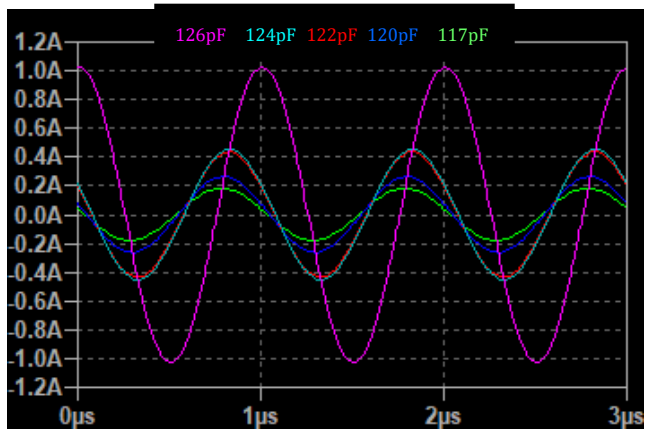


図 4.  $C_{TX}$  を変化させたときの出力電流

Fig.4 Output current of  $C_{TX}$  sweeps

## (2.2) ATAC 回路の原理と構成

電圧と電流の位相を一致させる方法を考える。図 5 に示すように、まず図 2 の主電源  $V_s$  とは別に、 $90^\circ$  の位相を持った別の補助電源を用意する。電圧と電流位相差が  $\phi$  であることは図 2 の場合と同様である。

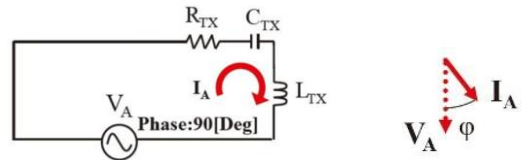


図 5. 補助電源の電圧・電流位相

Fig.5 Voltage and current phase of auxiliary power supply

次に図 6 に示すように主電源と補助電源を足し合わせると電流の位相が主電圧に一致する。 $\phi$  は素子ばらつきや経年劣化により変化するため  $V_A$  を適切に設定する必要がある。これが ATAC 回路の基礎原理である。

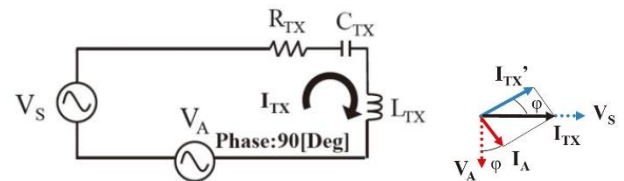


図 6. ATAC の電圧・電流位相

Fig.6 Voltage and current phase of the ATAC system

D 級アンプを使った ATAC 回路を図 7 に示す。主電源  $V_p$  は SW1 と SW2 の Duty50% スwitchングにより、ある周波数を持った矩形信号としてインダクタ側に流れる。SW3 と SW4 は SW1, SW2 と  $90^\circ$  の位相差を持ったスitchングを行う。キャパシタ  $C_A$  には適切な補助電圧が自動的に溜り、主電圧と電流の位相を補正する<sup>(1)</sup>。

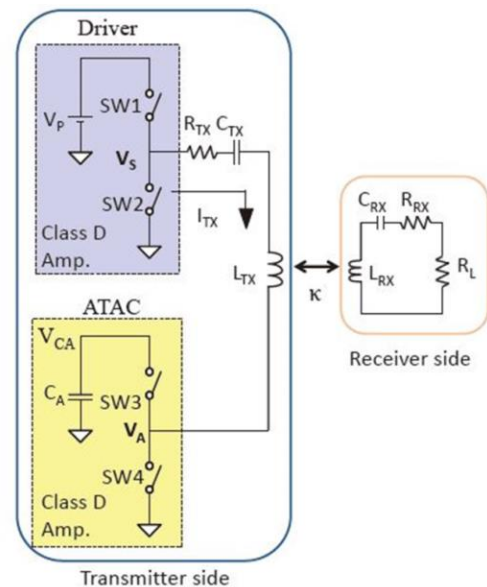


図 7. D 級アンプを用いた ATAC 回路

Fig.7 ATAC circuit using class D amplifier

### 3. 高調波抑制波形パターン

Duty50%の矩形波はフーリエ級数展開を使って以下のよう  
に表すことができる。

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin(2kf_{in}\pi t) \quad (k = 1, 3, 5, \dots) \quad (4)$$

ここで、位相をずらした3つの矩形波を足し合わせることで任意の高調波を消すような二値矩形パターンアルゴリズムを考える<sup>(2)</sup>。

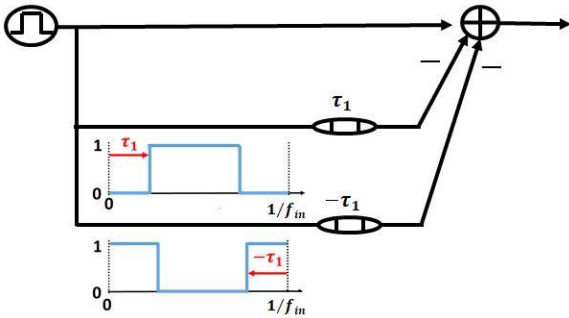


図 8. 矩形波を使った高調波抑制アルゴリズム

Fig.8 Harmonic suppression algorithm using rectangular wave

3つの矩形波の足し合わせは以下の式で表される。

$$f(t) - f(t - \tau) - f(t + \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \{1 - 2\cos(2kf_{in}\pi\tau)\} \sin(2kf_{in}\pi t) \quad (5)$$

ここで赤字部がゼロになるような $\tau$ をとれば高調波成分が抑制された矩形波が得られる。3次成分を消す場合、 $f_{in}\tau =$

$\frac{1}{18}$ とする。図 7 に示すような時間波形が得られ、図 10 に示すように周波数スペクトルでは3次高調波が抑制されていることが分かる。

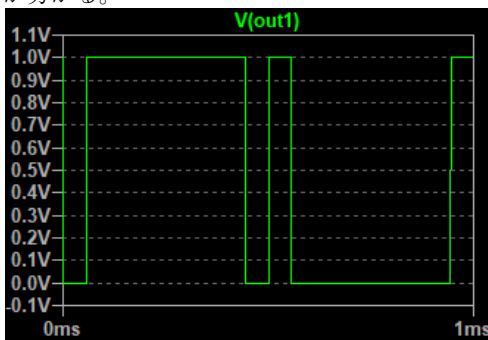


図 9. 3次高調波抑制パターン

Fig.9 Waveform pattern of 3<sup>rd</sup> harmonic suppression

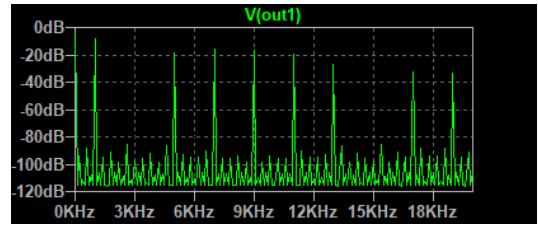


図 10. 3次高調波抑制パターン周波数解析

Fig.10 Frequency analysis of 3<sup>rd</sup> harmonics suppression

### 4. 提案手法とシミュレーション

D級アンプのスイッチ制御を高調波抑制パターンとし、インダクタ電流の高調波および ATAC 回路の動作を確認する。まずは Duty50%のスイッチングを行った場合のスイッチ電圧 $V_s$ の周波数解析およびインダクタ電流の周波数解析を図 11, 12 に示す。インダクタ電流には3次高調波が-50dBほど乗っている。

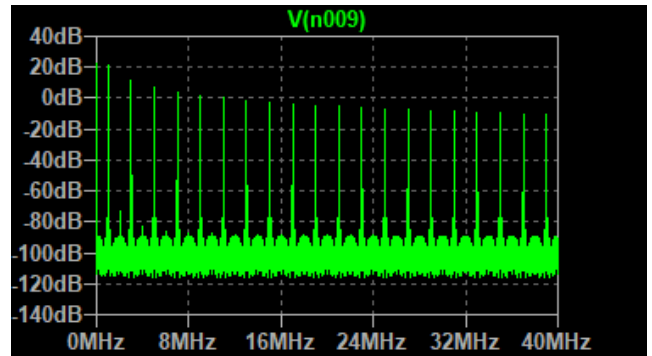


図 11. Duty50%時のスイッチ電圧 $V_s$ スペクトラム

Fig.11 Spectrum of switch voltage  $V_s$  at Duty 50%

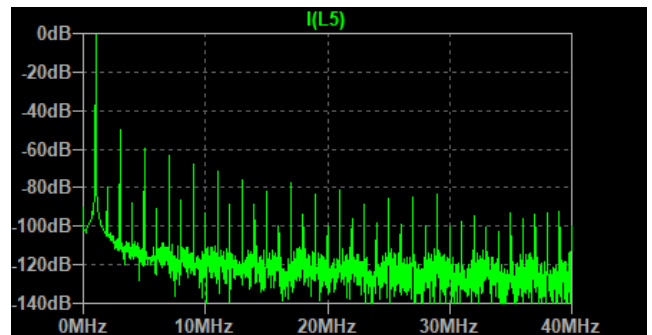


図 12. Duty50%時のインダクタ電流スペクトラム

Fig.12 Spectrum of inductor current at Duty 50%

次に3次高調波パターンを適用する。スイッチ電圧 $V_s$ の周波数解析を図 13 に示す。3次高調波は-70dBほどである。インダクタ電流の周波数解析を図 14 に示す。Duty50%矩形波と比べ、-20dBの抑制が見られる。

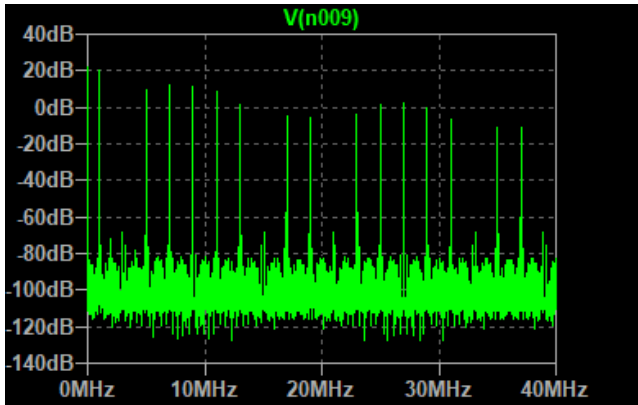


図 13. 3 次抑制パターンのスイッチ電圧  $V_s$  スペクトラム  
Fig.13 Spectrum of switch voltage  $V_s$  at 3<sup>rd</sup> harmonics suppression switching pattern

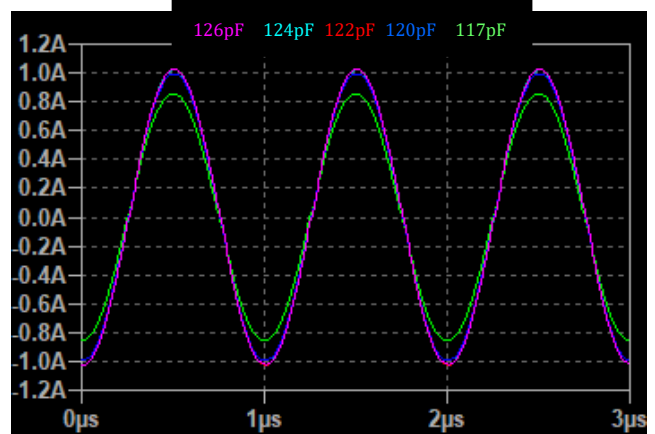


図 15. ATAC 回路の出力電流  
Fig.15 Output current of ATAC circuit

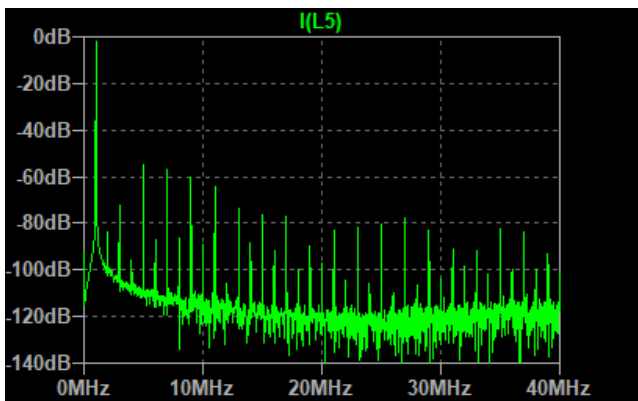


図 14. 3 次抑制パターンのインダクタ電流スペクトラム  
Fig.14 Spectrum of inductor current at 3<sup>rd</sup> harmonics suppression switching pattern

## 5. 結論

ATAC 回路を用いて磁界高調波を抑制する方法を提案した。ATAC 回路は Duty50%矩形波だけではなく、高調波抑制パターンでも動作し、磁界高調波を抑制できることをシミュレーションで示した。

## 文 献

- (1) "Proposal for a new resonance adjustment method in magnetically coupled resonance type wireless power transmission", Yuki Endo, Yasuo Furukawa, 2012 IEEE MTT-S International
- (2) "Low-Distortion Signal Generation for Analog/Mixed-Signal Circuit Testing Using Digital ATE" Masayuki Kawabata, Koji Asami, Shohei Shibuya, Tomonori Yanagida, Haruo Kobayashi, 2017 The 1<sup>st</sup> ITC-Asia

次に ATAC 回路の出力電流を図 15 に示す。シミュレーションパラメータは以下に示す。ATAC の効果により共振周波数のずれを補正している。

$$\begin{aligned}
 C_{TX} &= 123\text{pF}, 122\text{pF}, 121\text{pF}, 120\text{pF}, 117\text{pF} \\
 V_p &= 25\text{V}, \quad R_{TX} = 1\Omega, \quad L_{TX} = 200\mu\text{H}, \\
 L_{RX} &= 200\mu\text{H}, \quad C_{RX} = 126\text{pF}, \quad R_{RX} = 0\Omega, \quad R_L = 1\Omega
 \end{aligned}$$