

負荷変動を考慮した掘削機向けワイヤレス電力伝送システムの開発

学生員 井上 拳斗 正員 日下 佳祐 上級会員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Development of Inductive Power Transfer System for Excavator Considered Load Disturbance

Kent Inoue, Student Member, Keisuke Kusaka, Member, Jun-ichi Itoh, Senior Member (Nagaoka University of Technology)

This paper describes a development of an inductive power transfer (IPT) system for the excavator, which is operated under a caisson for a pneumatic caisson method. In conventional excavator systems, power is supplied via contact wires. Thus, fire may be caused when a spark occurred because a working room under the caisson is high atmospheric pressure environment. The IPT system is applied in order to solve the above problem. In order to apply the IPT system to the existing excavator system, load voltage should be stabilized without a wireless communication. In this system, series-parallel compensation is applied to cancel out the leakage inductance. Using the series-parallel compensation, the load voltage is constant regardless of load change. Constant-voltage characteristic is demonstrated with the prototype. As a result, the load-voltage is mostly stabilized at constant although it was changed from 1.02% to 4.38% when the output power is changed from 100% to 50%.

キーワード：ワイヤレス電力伝送, 掘削機, 負荷変動, 定電圧特性

Keywords : Inductive power transfer, Excavator, Load disturbance, Constant-voltage characteristic

1. はじめに

リニア中央新幹線をはじめとした鉄道や道路のインフラ整備において、シールドの発進/到達立坑や橋梁基礎の施工に多く用いられているのが、ニューマチックケーソン工法である⁽¹⁾⁽³⁾。図1にニューマチックケーソン工法の概要図を示す。この工法は、地上で鉄筋コンクリート製のケーソンを構築し、ケーソン下部に気密性の作業室を設け、空気圧により湧水を防ぎながら掘削作業を行い、所定の深さまでケーソンを沈設するものである。そのため、作業室は高気圧下となることから近年無人化が進められている⁽²⁾⁽³⁾。

掘削機は、作業室の天井に取り付けられた走行レールに沿って懸垂状態で走行する。これらの移動及び掘削機には電動油圧ポンプが用いられている。油圧ポンプ駆動用モータへの電力供給は、この走行レールに併設された絶縁トロリー線を介して行われているが、接点で火花(アーク)が発生する恐れは皆無とはいえない。前述の通り作業室は高気圧下であるため、火花が大規模な火災の原因になり得る。そこで、火花の発生を無くし火災発生リスクを軽減するため、掘削機への電力伝送にワイヤレス電力伝送を適用が検討されている⁽⁴⁾。

現在稼働している既存の掘削機システムでは、油圧ポンプ駆動用モータ(誘導機)は直入れ(全電圧始動)にて駆動されている。そのため、大きな負荷変動が発生する。

本論文では掘削機への電力伝送にワイヤレス電力伝送シ

ステムを適用するとともに、漏れインダクタンスのキャンセルとしてS/P補償方式を採用する。これにより、急速な負荷変動が発生しても一定電圧を出力可能となるため、既存の掘削機システムに大きな変更なくワイヤレス化が可能となる。

今回は掘削機駆動用モータの代わりに抵抗負荷を用いて負荷変動に対する定電圧特性について評価を行った。その結果、最大10kWで負荷変動をさせても所望の定電圧特性を得られることを確認したので報告する。

2. 掘削機向けワイヤレス電力伝送システム

〈2・1〉システム構成

図2に掘削機向けワイヤレス電力伝送システム構成を示

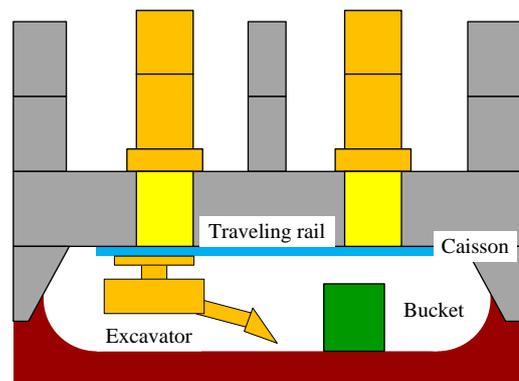


Fig. 1. Schematic of pneumatic caisson method.

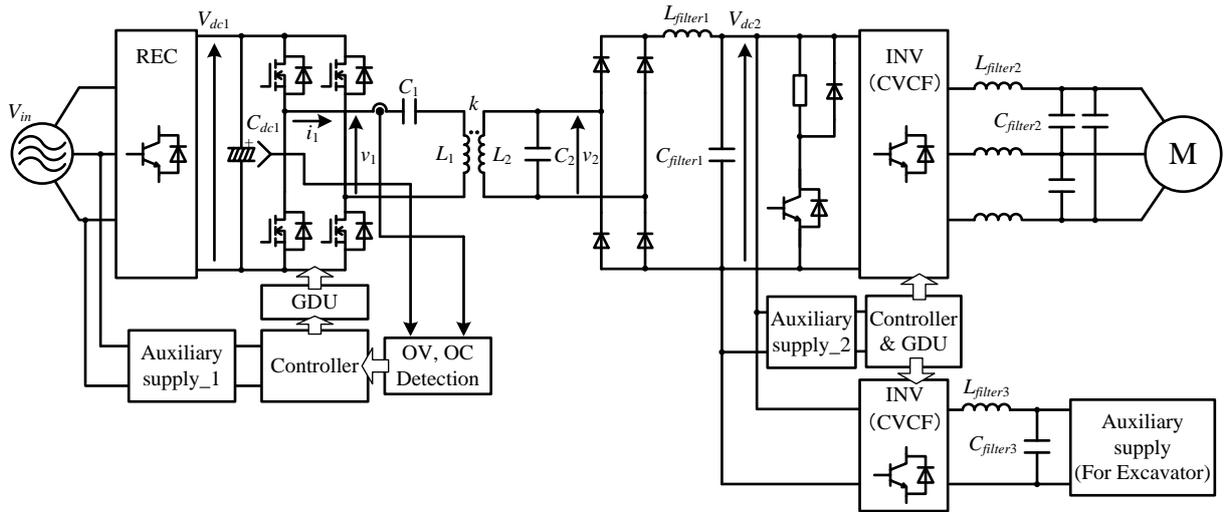


Fig. 2. Inductive Power transfer system for excavator.

す。本システムは、一次側は PWM コンバータ、単相インバータ、二次側は整流器、CVCF 三相インバータで構成され、伝送コイルを介して非接触で電力を送る。本システムの補償方式は、一次側直列—二次側並列補償方式 (S/P 補償方式) としている。そのため、一次側が定電圧駆動時は負荷の変動に関わらず、二次側は定電圧特性を示すため負荷電圧は一定となる。

図 3 に入出力電圧と入力アドミタンスの周波数特性を示す。これら特性は、負荷に対する高調波の影響についてシミュレーションで求めたものである。入出力電圧の周波数特性の基本波前後では、軽負荷でゲインが高くなり、重負荷では軽負荷に比べてゲインが低くなる。一方で、入力アドミタンスでは、軽負荷ほど基本波周波数付近のゲインが低下し、入力電流の低次高調波成分が相対的に大きく見える。

〈2・2〉ワイヤレス電力伝送システムの補償方式

共振を用いたワイヤレス電力伝送は、一次側及び二次側コイルに対して直列もしくは並列に共振コンデンサを挿入する。これにより、伝送コイルと共振させることで漏れインダクタンス成分をキャンセルし、一次側からみた力率を改善する。図 4 に代表的な共振方式を示す⁽⁵⁾。図 3(a)に示す方式は、送電側を直列 (Series)、受電側も直列とする S/S 補償方式である。この補償方式は、一次側を定電圧で駆動した場合に、二次側が定電流特性を持つ。従って、本システムのように現行のシステムに導入するためには後段に追加回路を挿入する必要があり、不適である。図 3(b)に示す方式は、送電側を直列、受電側を並列 (Parallel) とする S/P 補償方式である。この補償方式は、一次側を定電圧で駆動した場合に、二次側が定電圧特性を持つため既存のシステムへの適用が容易である⁽⁶⁾。

〈2・3〉伝送コイルの概要

図 5 に製作した伝送コイルを示す。上が送電コイル、下が受電コイルとなっている。本システムでは、サーキュラ方式に比べて高い磁気結合が得られるソレノイド型コイルを採

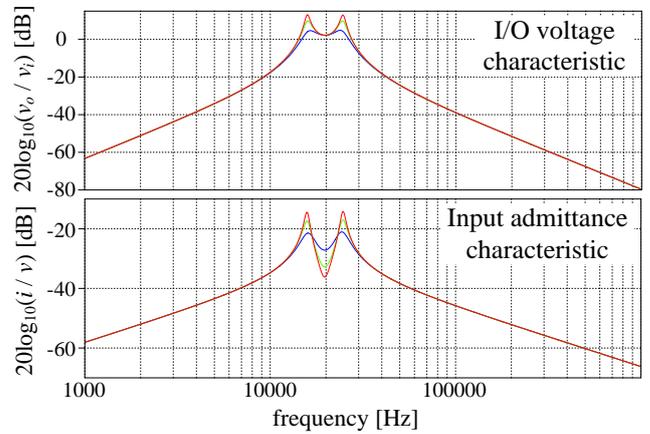
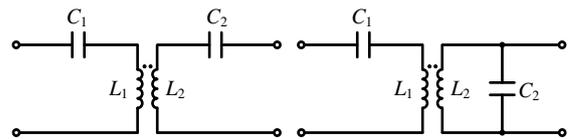


Fig. 3. Frequency characteristics of gain. (I/O voltage, input admittance)



(a) S/S compensation. (b) S/P compensation. Fig. 4. Compensation system.

用した。コア (TDK 社製 PC40 を使用) をアクリルケースに入れ、アクリルケースの上から巻線を巻きつけた構造となっている。コイルサイズは、コイル長 237 mm、コイル奥行 210 mm、コイル厚 20 mm である。伝送距離は、50 mm とした。

〈2・4〉伝送コイルの設計

図 6 にワイヤレス電力伝送システムの設計用等価回路を示す。この等価回路を用いて伝送コイルの各パラメータを設計する。回路上の R_{eq} は、フルブリッジ整流器を考慮した等価負荷抵抗を表す。等価負荷抵抗 R_{eq} は、文献(7)より負荷電流が最大となるように(1)式に従って求める。

$$R_{eq} = \frac{\pi^2 V_{2,DC}^2}{8 P_2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $V_{2,DC}$ は二次側直流出力電圧、 P_2 は出力電圧である。また、所望の出力を得るために必要な伝送コイルの一次側及び二次側の自己インダクタンスは、文献(7)より等価負荷抵抗 R_{eq} とそれぞれの励磁インダクタンスのインピーダンスが等しくなるように設計する。したがって(2)式及び(3)式で表される。

$$L_2 = \frac{R_{eq}}{\omega_0} \frac{k}{\sqrt{1+k^2}} \dots\dots\dots(2)$$

$$L_1 = L_2 \left(\frac{8 V_{1,DC}}{\pi^2 k V_{2,DC}} \right)^2 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $V_{1,DC}$ は二次側直流出力電圧、 ω_0 はスイッチング角周波数、 k は結合係数である。

また、コイルのサイズについては、文献(8)の結合係数マップを参考に所望の結合係数と伝送距離から決定する。

次に、共振コンデンサを設計する。共振コンデンサは、一次側からみた力率が1になるようにスイッチング周波数を基に設計する。したがって、(4)式及び(5)式で表される。

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1 (1-k^2)} \dots\dots\dots(4)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \dots\dots\dots(5)$$

3. 実機検証

(3-1) 試験条件

表1に試験条件を示す。なお、表中の一次側及び二次側の自己インダクタンスは、送電コイルと受電コイルを伝送距離50mmを介して設置した状態で測定した値である。

(3-2) 実験結果

図7に動作波形を示す。図7(a)は負荷電力5kW(定格50%)時の波形、図7(b)は負荷電力10kW(定格100%)時の波形である。この結果から、負荷電力の大きさに関わらずほぼ力率1で電力伝送できていることが分かる。

図8に測定した一次アドミタンスの周波数特性を示す。この結果から、軽負荷ほど基本波周波数のゲインが小さいことが分かる。これは、図3で示した通りの周波数特性と同様である。そのため、図7(a)の定格50%負荷の波形では一次電流の低次の高調波成分が相対的に大きく見えるために波形にひずみが生じてみえる。

図9に負荷電力に対する負荷電圧特性を示す。図9から負荷電圧は685Vに設定しているが、負荷電力の増加に伴い出力電圧が低下している。これは負荷電力の増加に伴い、巻線抵抗で生じる電圧降下の影響が大きくなるためである。しかし、実験結果では巻線抵抗分(1Ω)以上の電圧降下がある。そこで、一次側共振コンデンサの容量変化に対する電圧変動率について考察する。なお、本試作機では温度補償系(NP0)の積層セラミックコンデンサを用いた。

図10に負荷電力に対する電圧変動率特性を示す。実線は実験により得られた電圧変動率であり、破線は一次共振コ

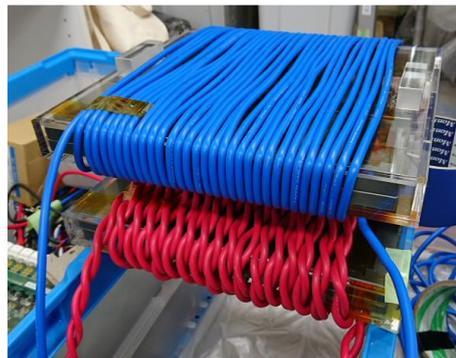


Fig. 5. Transmission coils.

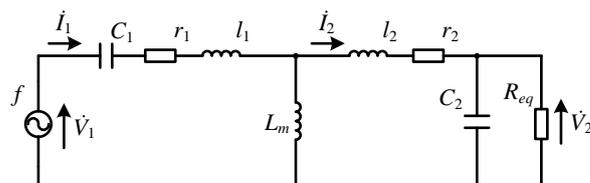


Fig. 6. Equivalent circuit for designed IPT system.

Table 1. Specification of experiment.

	Symbol	Value
Input voltage	V_{in}	400 V
Primary DC voltage	$V_{1,DC}$	685 V
Secondary DC voltage	$V_{2,DC}$	685 V
Rated Output power	P_{out}	10000 W
Switching frequency	f	20 kHz
Coupling coefficient	k	0.41
Primary inductance	L_1	393 μH
Secondary inductance	L_2	113 μH
Primary capacitance	C_1	198 nF
Secondary capacitance	C_2	582 nF
MOSFETs	BSM120D12P2C005	
Diodes	DH 2X61-18A	

ンデンサの容量を0~15%低下させた時の電圧変動率をシミュレーションにより取得したものである。なお、二次側コンデンサの容量は一定と仮定している。図10より、巻線抵抗による電圧降下に加え、共振パラメータの誤差に応じて電圧変動率が増加していく傾向にあることがわかる。これは共振パラメータのズレで生じたリアクタンス成分が負荷電流に応じた電圧降下を生じさせたためである。特に、一次側コンデンサ容量が15%低下した場合を想定した際の電圧変動率が実験結果と概ね一致している。なお、15%の一次側コンデンサ容量の低下は一次側コイルのリアクタンスが6.4Ω増加させたことに等しい。このことから、実験結果が生じた電圧変動は共振電圧印加によるコンデンサ容量の変化により生じたものであると推察できる。しかし、負荷変動に関わらず出力電圧の電圧変動率は、定格電圧に対して最大で4.38%であり、後段のPWMインバータの駆動には支障がない範囲に抑制できている。

図11に負荷変動時の過渡特性を示す。本試験では、負荷電力を10kWから5kWにステップ上に変化させた。実験

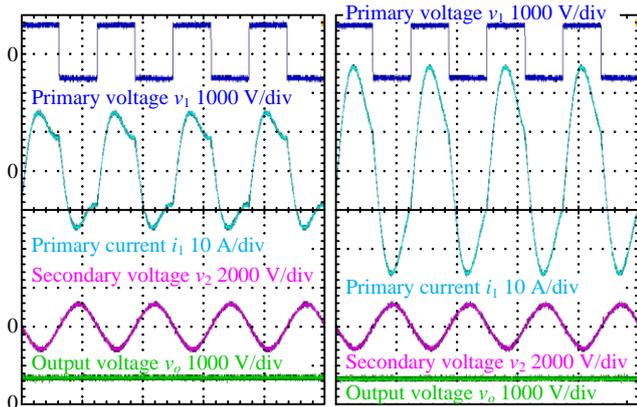


Fig. 7. Operation waveforms.

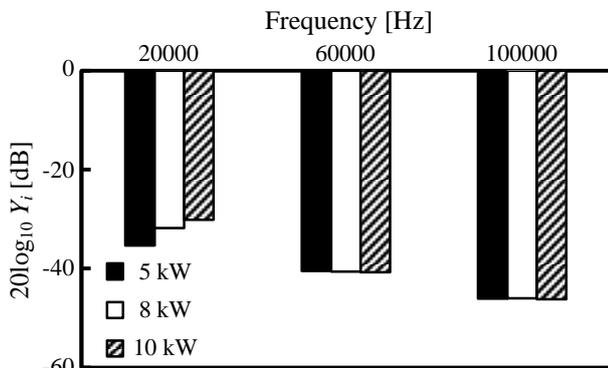


Fig. 8. Frequency characteristics of primary admittance.

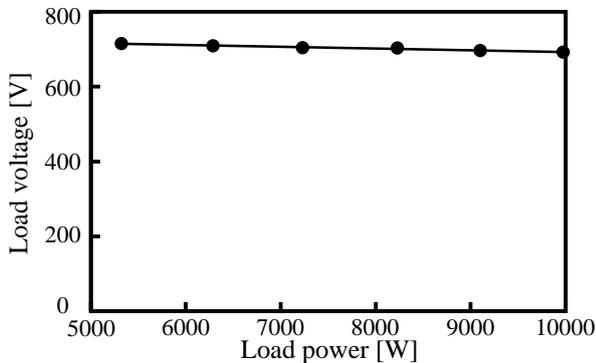


Fig. 9. Load voltage characteristics.

結果から、負荷急変をさせてもワイヤレス電力伝送システムの出力電圧が定電圧特性を示していることが分かる。

以上から、掘削機向けワイヤレス電力伝送システムのリアクタンスキャンセルに S/P 補償方式を採用することで負荷電力に関わらず負荷電圧を一定にできることを確認した。また、負荷を急激に変化させても同様に定電圧特性を得られることを確認した。

4. まとめ

本論文では、掘削機の従来の接触給電の火花による火災リスクの軽減を目的とし、既存の掘削機に適用可能なワイヤレス電力伝送システムを開発した。既存の掘削機は、駆動用モータ（誘導機）に対してシステムを直入れ（全電圧始動）するため、負荷変動が大きい。そこで、漏れインダクタンスの

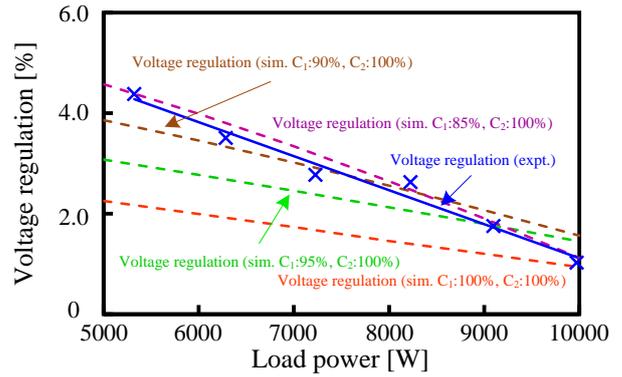


Fig. 10 Voltage regulation characteristics.

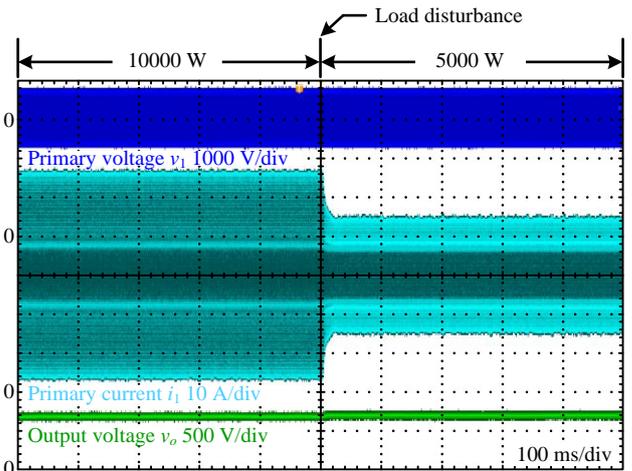


Fig. 11. Operation waveform in load disturbance.

キャンセル手法として S/P 補償方式を適用し、負荷変動に対する負荷電圧の安定化を図った。その結果、定格に対する負荷 100% から 50% まで変動させた時に負荷電圧の電圧変動率は、1.02% から 4.38% に変動したものの、負荷電圧が定電圧特性を示すことを確認した。今後は、実際に掘削機駆動モータ（誘導機）を負荷として接続した場合の負荷電圧特性について評価する予定である。

文 献

- (1) 株式会社大本組: 「ニューマチックケーソン工法の概要」
- (2) 小滝勝美: 「ニューマチックケーソン工法の無人化施工技術」, 建設の施工企画, pp.53-57 (2007)
- (3) 小滝勝美: 「ROVO ケーソン工法-ニューマチックケーソン工法の無人化施工技術」, ARIC 情報, No.96, pp.30-36 (2010)
- (4) 日下佳祐, 伊東淳一: 「伝送周波数と伝送電力に着目した電磁誘導現象を用いた非接触給電システムの開発動向」, 電学論 D, Vol.137, No.5, pp.445-457 (2017)
- (5) 居村岳広, 堀洋一: 「電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論」, 電学論 D, Vol.135, No.6, pp.697-710 (2015)
- (6) 藤田敏博, 金子裕良, 阿部茂: 「直列および並列コンデンサを用いた非接触給電システム」, 電学論 D, Vol.127, No.2, pp.174-180 (2007)
- (7) Roman Bosshard, Johann Walter Kolar, Jonas Muhlethaler, Ivica Stevanovic, Bernhard Wunsch, Francisco Canales: 「Modeling and η - α -Perato Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles」, IEEE Transactions, Vol.3, No.1, pp.50-64 (2015)
- (8) 井上拳斗, 日下佳祐, 佐藤大介, 伊東淳一: 「ソレノイドコイルを用いたワイヤレス電力伝送システムにおける結合係数マップ」, 電子情報通信学会 EE 研/WPT 研合同研究会, WPT2016-34, pp.85-90 (2016)