

試験機ダイナモへのオープン巻線モータ技術の適用

Application of the Open-Windings Motor Technology to the Test Bench for an Automobile

Motors having a wide speed range are applied to development of drive systems such as automotive engines, transmissions and various gears. If the motor is a permanent magnet synchronous motor, the motor current is increased by designing a wide speed range. Therefore, it has become difficult to increase the power of the motor. The motor of wide speed range and high power needs the high terminal voltage.

In this paper, we tested the inverter system using an open-windings motor which the neutral point of the three phase windings is separated. We have proposed a control system which can suppress zero phase current in the common power supply system. Characteristics of the system using the open-windings motor of 55kW 6000-16000min⁻¹ and two 3 phase PWM inverters were obtained by the common power supply system and the isolated power supply system.

中間 貴生
Takao Nakama

北条 善久
Yoshihisa Hojo

1. まえがき

自動車のエンジン、トランスミッション、各種ギアなどの駆動系の開発では、試験信頼性や環境配慮の観点から制御応答が良く、電力として回生可能な数百kWの永久磁石同期モータを利用した自動車試験機用ダイナモが適用されている。駆動系の負荷用途では1000～3000min⁻¹、エンジンやEV用モータの代替用途では6000～16000min⁻¹の広範囲のパワーコンスタント範囲を持つワイドレンジモータが要求される。

永久磁石同期モータの場合、モータを駆動するインバータが出力可能な最大電圧より、最高回転時におけるモータ端子間電圧が小さくなるようにモータの誘起電圧を設計するので、定格回転時におけるモータ端子間電圧を下げた設計となる。そのためワイドレンジ化することによりモータ電流が増加することとなり、さらなる大容量化は困難となっている。

ワイドレンジモータの大容量化にはモータの端子間電圧を上げる必要がある。スター結線の三相交流モータ巻線の中性点を分離し、そこに新たに三相PWMインバータを接続することで、インバータへの入力電圧を上げることなく、モータの等価端子間電圧を1.6～2.0倍にする方法が提案されている。

本稿では、55kW、6000～16000min⁻¹のワイドレンジオープン巻線モータに対して、電源の構成を電源共通方式と電源絶縁方式で検証試験を行ったのでその結果を報告する。

2. 回路構成

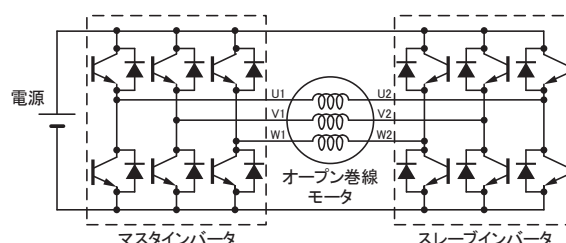
オープン巻線モータを用いたインバータシステムは、中性点が分離された三相交流モータ巻線の両端に三相PWMインバータを接続した構成となっており、図1のように二つの三相PWMインバータの電源を共通にした電源共通方式と、図2のように三相PWMインバータの電源を絶縁された別々

の電源にした電源絶縁方式がある。

このシステムでは、マスタインバータの出力電圧ベクトル V_{i1} とスレーブインバータの出力電圧ベクトル V_{i2} の合成ベクトルがモータ電圧ベクトル V_{im} となるため、式(1)のようにインバータ一台で駆動する場合に比べモータに大きな電圧を印加することができる。

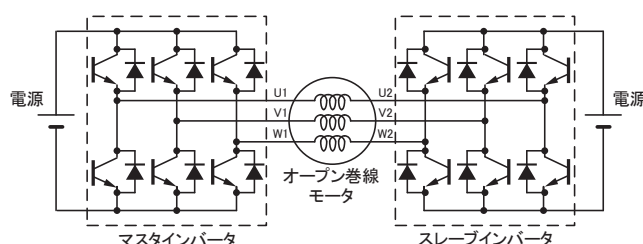
$$V_{im} = V_{i1} - V_{i2} \dots\dots\dots (1)$$

電源共通方式は回路構成がシンプルであるが、その構造から三相電流の総和は必ず0になるわけではなく、インバータやモータに零相電流が流れ、零相電流によるモータの発熱や損失増加が懸念される。零相電流を抑制するには、インバー



■ 図1 オープン巻線モータシステム(電源共通方式)

Fig.1 Open-windings motor system of common power supply method



■ 図2 オープン巻線モータシステム(電源絶縁方式)

Fig.2 Open-windings motor system of Isolated power supply method

タの電源側もしくは出力側に零相リアクトルを追加する方法がある。電源絶縁方式はインバータに供給する電源を絶縁するための絶縁トランスや絶縁チョッパが必要であり、システムが大型化しやすいが零相電流が流れない利点がある。

永久磁石磁束方向をd軸、d軸と直交する軸をq軸、零相に対応する軸をz軸で表したオープン巻線モータの電圧方程式を式(2)に、トルクを式(3)に示す。式(3)で表現されるように零相電流 i_z は直接トルクを発生することはないが、式(2)のようにd軸電流 i_d とq軸電流 i_q と干渉関係にあり、零相電流リップルによってトルクリプルを増加させる恐れがある。また、零相電流によるモータやインバータの発熱増加や効率悪化も懸念される。

インバータのスイッチング信号生成において、一般的なモータのインバータ駆動で行われている信号波に三倍高調波を重ねた電圧利用率向上法は、出力電圧に零相電圧を足し合わせているため、この手法を用いると零相電圧に起因した零相電流がモータやインバータに流れることになる。また、永久磁石同期モータでオープン巻線モータを構成すると、ロータ構造により誘起電圧に3n次の電圧成分を含む場合があり、それが交流の零相電圧成分として各巻線に電圧が発生し、零相電流リップルが流れる原因となる。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_c \cos 3\theta_{re} \\ 0 & L_q & -L_c \sin 3\theta_{re} \\ L_c \cos 3\theta_{re} & -L_c \sin 3\theta_{re} & L_z \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & -\omega_{re} L_q & -2\omega_{re} L_c \sin 3\theta_{re} \\ \omega_{re} L_d & R & -2\omega_{re} L_c \cos 3\theta_{re} \\ -3\omega_{re} L_c \sin 3\theta_{re} & -3\omega_{re} L_c \cos 3\theta_{re} & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_z \end{bmatrix} + \omega_{re} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_a \\ \varphi_{a3} \sin 3\theta_{re} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_m = P \{ \varphi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (3)$$

v_d, v_q, v_z : dqz軸電圧

i_d, i_q, i_z : dqz軸電流

L_d, L_q, L_z : dqz軸インダクタンス

L_c : dq軸とz軸の干渉インダクタンス

θ_{re} : 電気角 R : 一次抵抗

ω_{re} : 電気角速度 φ_a, φ_{a3} : 磁石磁束

T_m : モータトルク P : 極対数

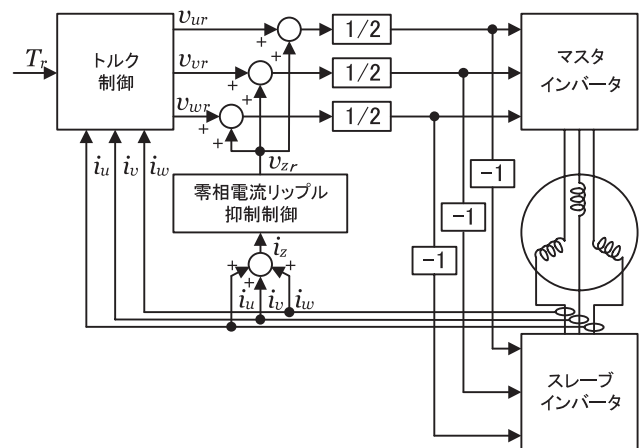
3. 制御手法

システムを小型化するために電源共通方式を採用するには、零相電流を抑制する必要がある。本稿では、零相電流のフィードバック制御による定常的な零相電流の抑制と、周期外乱オブザーバによる周期的な零相電流の抑制を行うこと

で、制御的に零相電流を抑制する手法を開発した。

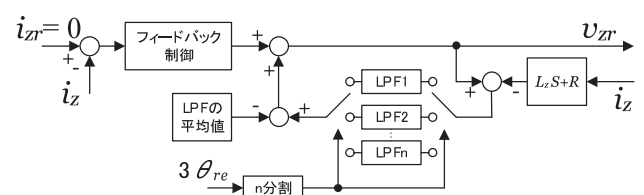
オープン巻線モータ制御の構成を図3に、零相電流リップル抑制制御器の構成を図4に示す。零相電流リップル抑制制御器は、三相電流の総和で計算できる零相電流をインダクタンスの零相成分と一次抵抗で表した零相の一次遅れモデルの逆モデルに入力し、零相電圧指令値との差分を取ることでモータに含まれる電圧リップルを抽出する。抽出した電圧リップルはn個の低域通過フィルタ(LPF)で構成されるフィルタ群に入力する。この時、零相電流リップル成分で最も大きく表れる3次成分を抑制するために、入力されるLPFをモータ電気角位相の3倍周期で変化する位相に同期して切り替え、3次の零相電流リップルに同期した電圧リップルをフィルタ群へ保存する。同じように3次の零相電流リップルに同期して読みだすLPFを切り替え、LPF出力値からフィルタ群の平均値を引き、零相電流のフィードバック制御より得られた零相電圧指令へ足し合わせることで、零相電流リップルを抑制する零相電圧指令が演算できる。この零相電圧指令をトルク制御器で生成したUVW相電圧指令値に足し合わせ、各相電圧指令を1/2倍することでマスタインバータの電圧指令とし、さらに-1倍したものをスレーブインバータの電圧指令とする。

零相電流リップル抑制制御を行うには零相電圧を自由に制御できる範囲で駆動する必要があるため、電源共通方式のモータ最大印加電圧(線間電圧相当)は、三相入力電圧の約1.6倍となる。零相電流が流れない電源絶縁方式のモータ最大印加電圧(線間電圧相当)は、三相入力電圧の約2倍である。



■ 図3 オープン巻線モータの制御構成図

Fig.3 Control structure of the open-windings motor



■ 図4 零相電流リップル抑制制御器

Fig.4 Zero-phase current ripple controller

4. 実機試験

本試験に使用した機器構成を図6に示す。電源は負荷モータ用インバータの整流器によって3φ400Vを整流し、電源共通方式の回路構成となるようにマスタインバータとスレーブインバータへ供給している。

オープン巻線を駆動するインバータは当社汎用インバータVF66Bを2台用いた。二つのインバータのスイッチングタイミングをそろえるため、インバータが相互通信を行えるように制御基板を開発した。マスタインバータの制御基板は二つのインバータのゲート信号生成を含むモータ制御全般を行うが、スレーブインバータの制御基板は保護動作および、直流電圧検出値や保護情報の送信のみを行う。

オープン巻線モータは、当社製品であるEDモータをベースに、オープン巻線構造とするためにスター結線の中性点を分離し、各巻線の両端を引き出すように改造した(図5)。オープン巻線EDモータのスペックを表1に示す。

4.1 試験結果

開発したオープン巻線システムの基本特性を確認するため、駆動試験を実施した。図7にオープン巻線EDモータを4000min⁻¹で回転させたときのU相電流と、三相電流の総和を1/3倍した一相あたりの零相電流を示す。周期外乱オブザーバを用いた零相電流リプル抑制制御により零相電流の高調波成分を0に制御するため、正弦波状のU相電流が得られている。

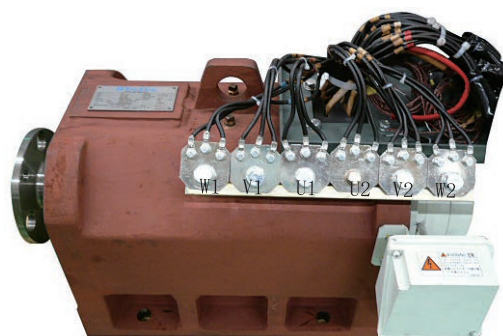
図8に加速試験時のモータ回転速度、オープン巻線EDモータの巻線電圧から線間電圧実効値に換算した出力電圧、オープン巻線EDモータの電流実効値、z軸上に換算した零相電流、定格トルクで正規化した出力トルクを示している。それぞれのデータは制御基板のメモリ情報を16ms周期で読み込

んだものである。10000～16000min⁻¹の範囲では、制御系のサンプル周期に対し、零相電流リプルの周期が短くなるため、周期外乱オブザーバのLPFに十分なデータが入力されず、加速時は零相電流リプルが増大している。なお、定常領域においては周期外乱オブザーバのLPFに十分な情報が蓄積されるため、十分な零相電流抑制性能を確認している。オープン巻線EDモータが16000min⁻¹に達すると線間電圧に換算したモータ印加電圧は678Vであり三相入力電圧426Vの約1.59倍となった。

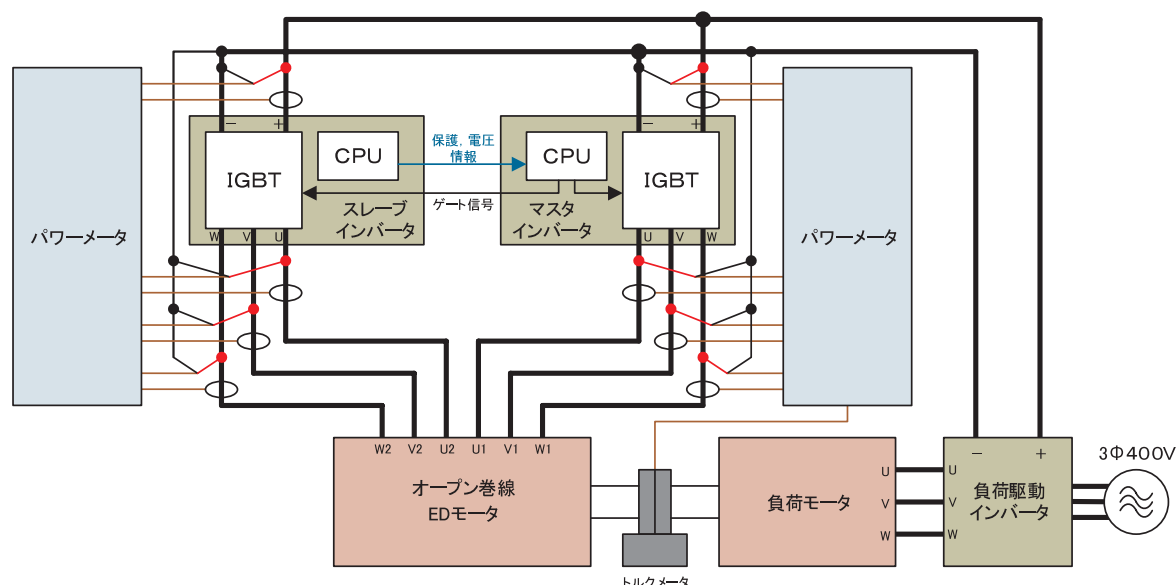
■ 表1 オープン巻線EDモータのスペック

Table1 Specifications of the open-windings ED motor

項 目	仕 様
定格電圧／最大電圧	310V/740V
定格電流／最大電流	60A/135A
定格速度／最大速度	6000min ⁻¹ /16000min ⁻¹
定格周波数／最大周波数	300Hz/800Hz
極数	6

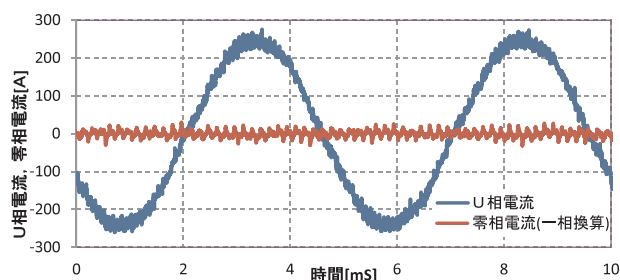


■ 図5 オープン巻線EDモータ
Fig.5 Open-windings ED motor

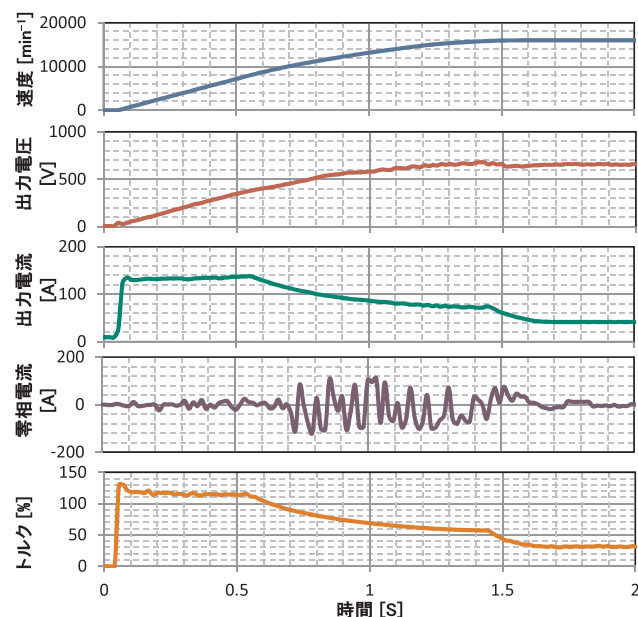


■ 図6オープン巻線モータの試験構成図

Fig.6 Test configuration diagram of the open-windings motor



■ 図7 オープン巻線モータの電流波形（電源共通方式）
Fig.7 Current waveform of open-windings motor



■ 図8 オープン巻線システムの運転特性（電源共通方式）
Fig.8 Operating characteristics of open-windings motor system

4.2 効率測定

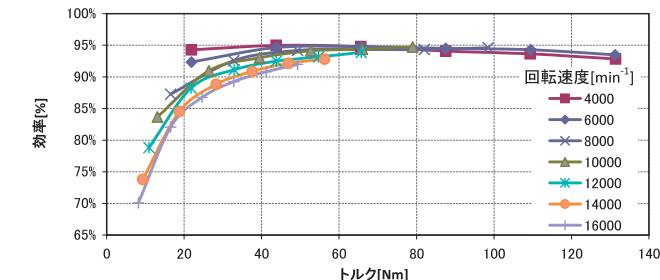
効率試験の接続図を図6に示す。試験はオープン巻線EDモータと負荷機とをトルク計を介して接続し、負荷機を駆動するインバータとオープン巻線モータを駆動するインバータを直流リンクで接続した返還負荷法により実施した。マスタインバータとスレーブインバータの入出力電力をYOKOGAWA製パワーメータ2台で同期測定し、二つのインバータ出力の合計をモータ入力としている。この時パワーメータの結線は3P4W結線で測定した。

執筆者略歴

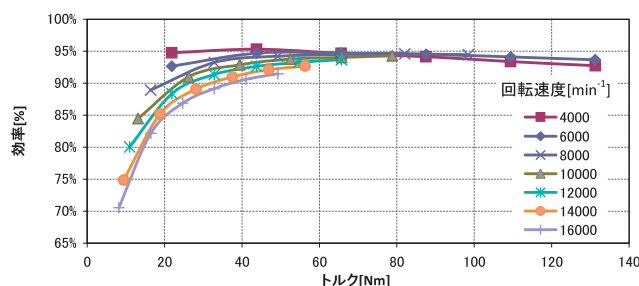


中間 貴生

2011年入社。現在、研究所技術研究部制御理論研究室に所属し主にACサーボシステムの高性能化に関する研究に従事。電気学会会員。



■ 図9 モータ効率特性（電源共通方式）
Fig.9 Characteristics of inverter efficiency (power common method)



■ 図10 モータ効率特性（電源絶縁方式）
Fig.10 Characteristics of inverter efficiency (power insulation method)

電源共通方式のモータ効率は図9のとおりである。比較のため、電源絶縁方式のモータ効率を図10に示す。電源共通方式の効率は最高効率95%と電源絶縁方式の効率とはほぼ同等の結果となり、零相電流リプル抑制制御によりシステム構成をシンプルに保ちながら、十分な零相電流抑制特性を得られている。

5. むすび

本稿では、オープン巻線モータを用いた試験機ダイナモ向けのインバータシステムを提案した。オープン巻線モータを用いることで、インバータの直流電圧を昇圧せずに、等価的にモータ巻線に印加される電圧を高めることが可能となることを確認した。また、開発した零相電流リプル抑制制御を用いることで電源共通方式のインバータ構成とした場合でも零相電流を十分に抑制できることを確認した。これは絶縁トランスや零相リアクトルを用いずにオープン巻線モータ用いたインバータシステムを構成できることを意味し、低コスト化につながる。



北条 善久

1998年入社。現在、産業事業部開発部制御器開発課に所属し主に産業用インバータの開発設計に従事。電気学会会員。自動車技術会会員。