

フライホイール誘導機とマルチレベル変換器による 核融合磁場電源の検討

日大生産工 ○加藤 修平 東京工業大学 村山 真道
日大生産工 小井戸 純司

1. まえがき

核融合装置や加速器など磁場電源に求められる性能は大きく分けると(1)瞬間的かつ間欠的な数百MW程度の大電力の補償(補完)と(2)数kVの高電圧発生との2つである。(1)については、例えば日本最大の核融合実験装置JT-60の各電源合計(トロイダル・ポロイダル・NBI、他)で約1000 MWに上る^{1),2)}。そのため、間欠的な電力消費による電力系統への影響を抑えるべく、フライホイール付発電機により一部電力を補償(トロイダル電源に対しては約200 MWを補完)している。(2)についてもインダクタンス成分が主である各コイルに立ち上げ時間0.1秒程度の急峻な傾きの電流を供給するため、高電圧($L \times di/dt$ が大きい)が必要となる^{3),4)}。

従来、(1)については主に同期機と慣性大なるフライホイールを軸直結したフライホイール付発電機によって大電力の補償(補完)を行っていた。しかし、同期機は界磁巻線やスリップリングが必要であり、大型で定期メンテナンスが必要という課題があった。また、従来(2)については半導体スイッチの耐電圧(例えば3.3kV系IGBTなど)には限界があるため、変圧器で絶縁したブリッジ回路(セル)を直列接続していた⁵⁾。そのためブリッジ回路毎に変圧器による電源供給が必要になるという課題があった。

そこで本稿では(1)の課題に対して界磁巻線やスリップリングが不要なかご形誘導機を用いたフライホイール付発電機を提案する。また(2)の課題に対して各ブリッジ回路で分担する出力電圧を磁場コイルの抵抗成分とインダクタンス成分に明確に分離することにより、ブリッジ回路毎に変圧器(電源供給)が不要なマルチレベル変換器を提案する。以下に第2章〈2・1〉フライホイール発電機の構成、〈2・2〉100 kWクラスでの放電実験結果及び第3章〈3・1〉マルチレベル変換器の構成、〈3・2〉制御方法、〈3・3〉シミュレーション結果について報告する。

2. 誘導機によるフライホイール付発電機

〈2・1〉誘導機と同期機のシステム構成比較

図1(a)に従来のフライホイール発電機(同期機)の構成を示す。同期機は交流出力電圧制御が容易であるが界磁巻線・スリップリングが必要で電気機械的構造が複雑ゆえ小型化が困難でブラシのメンテナンスが必要である。また、慣性大なるフライホイールが機械的に接続されているため、起動・再加速のための可変周波数電源が必要となる。

これに対し図1(b)にかご形誘導機を用いた提案する構成を示す。かご形誘導機は回転子がかご形のため界磁巻線が不要で構造が単純であるため、通常定格の約2~3倍の過負荷も可能である。また、誘導機は慣性大なるフライホイールが接続されていても減電圧(リアクトル等)して起動することができる。一方でかご形誘導機は無効電力制御により交流側(電機子側)から励磁するため交流出力電圧制御が難しいという欠点があったがこれまで利用されていなかった。しかしながら図1(b)に示すような磁場電源用途ではフライホイール発電機の交流出力電圧はおおまかな制御

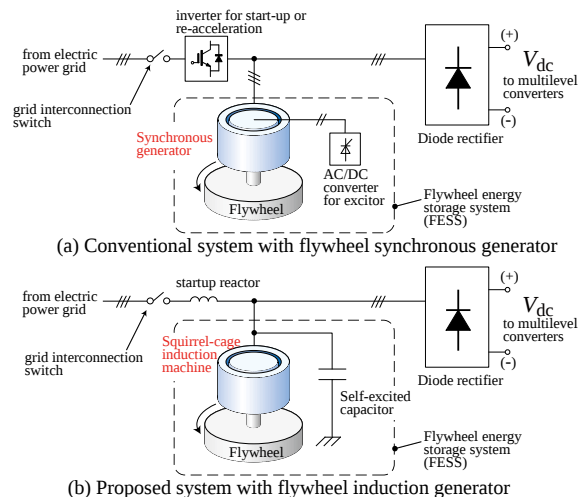


図1 同期機と誘導機のフライホイール発電機システム構成比較

Fusion Magnet Power Supplies by Using a Flywheel Induction Generator and Multilevel Converters

Shuhei KATO, Masamichi MURAYAMA and Junji KOIDO

で良い。というのはダイオード整流器経由後に最終段のマルチレベル変換器で適切に電流制御が行われるためである。以下にかご形誘導機による100 kWフライホイール発電機のプロトタイプの詳細について述べる。

〈2・2〉 100 kW フライホイール付発電機

図2に製作したかご形誘導機による100 kWフライホイール発電機のプロトタイプ外観を示す。また表1にその諸元を示す。フライホイールの材質はSS400であり、フライホイールはかご形誘導機

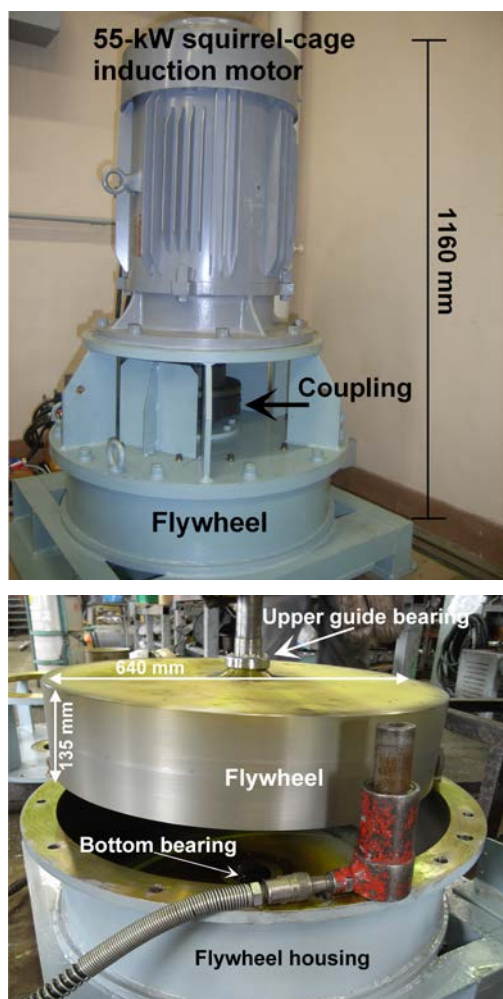


図2 かご形誘導機による100 kWフライホイール発電機プロトタイプ外観

表1 100 kWフライホイール発電機の諸元

Moment of inertia	I	17.9 kgm ²
Flywheel size	D, H	D=640, H=135 mm
Rated voltage	V	200 V(L to L, RMS)
Output power	P_{FW}	100 kW
Standby speed	N	1500 min ⁻¹ (@50 Hz)
Stored energy	E	220 kJ @ 1500 min ⁻¹
Mechanical losses	P_{loss}	0.45 kW @1500 min ⁻¹

とカップリングで直接接続されている。フライホイールというと高速回転で準真空が主流であるが、真空排気ポンプなどの付帯設備や容器の高気密化、絶縁耐力低下からの保護等への対策が必要となり高コストとなってしまう。そのため本フライホイールは比較的低速(1500 min⁻¹)で利用しハウジング内は大気圧であるが、機械損失(風損+ベアリング損失)は約0.45 kWと定格出力100 kWに対して十分小さく設計できている。また、かご形誘導機は連続定格55 kWの汎用品を採用しているが、本用途では瞬間的かつ間欠的に発電機を使用するため、連続定格の約2倍の100 kWをフライホイール発電機の定格としている。

〈2.3〉 トロイダル磁場コイルへの放電実験

本節では電力系統からの電力は利用せずフライホイール発電機のみからダイオード整流器を経由して直接、磁場コイルへ放電する実験を行った。本実験ではマルチレベル変換器は省略した。というのは本来であれば図1で示したシステムのように最終段のマルチレベル変換器で磁場コイルへ放電するが、本実験はフライホイール発電機の放電能力検証という位置付けのためだからである。実験では東京工業大学の非円形断面小型トカマク装置のトロイダル磁場コイル(TFコイル、約0.5 Ω、100 mH)へ放電する実験を行った。

図3にフライホイール発電機出力電力やTFコイル電流等の実験結果を示す。同図より約200 ms、100 kW以上の発電機出力電力 P_{FW} が確認できる。また、放電時間を延長させるには発電機出力電圧制御を行う自励用キャパシタの追加投入等で可能である。以上よりかご形誘導機によるフライホイール発電機プロトタイプを用いる

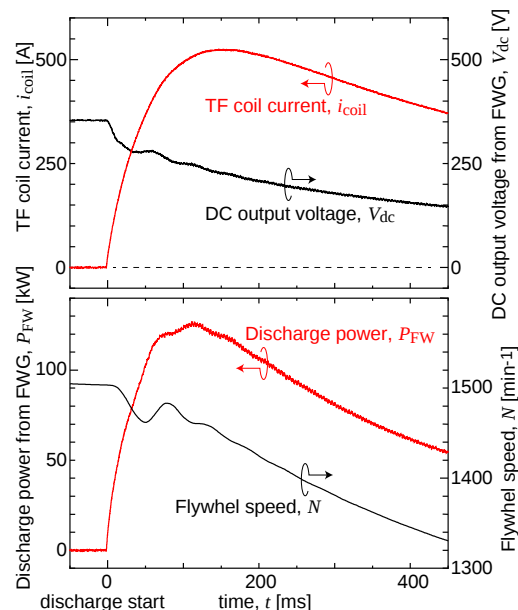


図3 かご形誘導機によるフライホイール発電機のTFコイルへの放電実験結果

割し指令する。さらに、磁場コイルの実際のパラメータ R および L と制御で利用するパラメータ R_{ctrl} および L_{ctrl} には必ずミスマッチが存在する。このモデル化誤差を埋めるため磁場コイル電流 i_{coil} が指令値 i_{coil}^* に追従するようにPI制御により電源が接続されているブリッジ回路に電圧指令値として加算する。このPI補償器の比例ゲイン K と積分時定数 T_i は磁場コイルを単純な一時遅れ系と考えることで遮断周波数 ω_c を決定すれば次式となる。

$$K = \omega_c \times L \cdots (2)$$

$$T_i = L/R \cdots (3)$$

スイッチング周波数は通常、数kHzのため実際は $\omega_c=1000\sim 2000$ rad/s程度となる。

〈3・3〉マルチレベル変換器のシミュレーション

表2にシミュレーションで使用した大型トカマクのTFコイルパラメータ等の諸元を示す。フローティングキャパシタの初期充電電圧 $V_{c,max}$ は1200V系IGBTやMOS-FETが適用可能なように $V_{c,max}=900$ Vに設定した。式(1)より表2の電流立上げ性能を満たすには直列接続数 $n=3$ で $C_n=115$ mFのフローティングキャパシタが各ブリッジ回路に必要となる。シミュレーションではTFコイルに約10%のモデル化誤差があるとして R_{ctrl} および L_{ctrl} を設定した。

図6に表2の諸元を基にしたシミュレーション結果を示す。同図よりフライホイール発電機からの電源が接続されているブリッジ回路の出力電圧は抵抗成分電圧を分担するためTFコイル電流指令値 i_{coil}^* と連動した波形となっていることが確認できる。一方、フローティングブリッジ回路の出力電圧は電流立上げ時・立下げ時にインダクタンス電圧を分担するため矩形波となっている。さらに、フローティングキャパシタ電圧 $v_{c,Ln}(t)$ はインダクタンス電圧を確保できる限界値と初期充電電圧 $V_{c,max}$ の区間を上下し適切に静電エネルギー

表2 シミュレーションで使用した大型トカマクTFコイル及びマルチレベル変換器の諸元

TF coil resistance	R	0.14 Ω
TF coil inductance	L	44 mH
Current ramp rate	di_{coil}/dt	23 kA/s
TF coil flat-top current	I_{max}	2.3 kA
Resistor in DSP	R_{ctrl}	0.10 Ω
Inductance in DSP	L_{ctrl}	40 mH
Cascade number	n	3
Max. floating capa. volt	$V_{c,max}$	900 V
Floating capacitance	C_n	115 mF
Switching frequency	f_{sw}	10 kHz

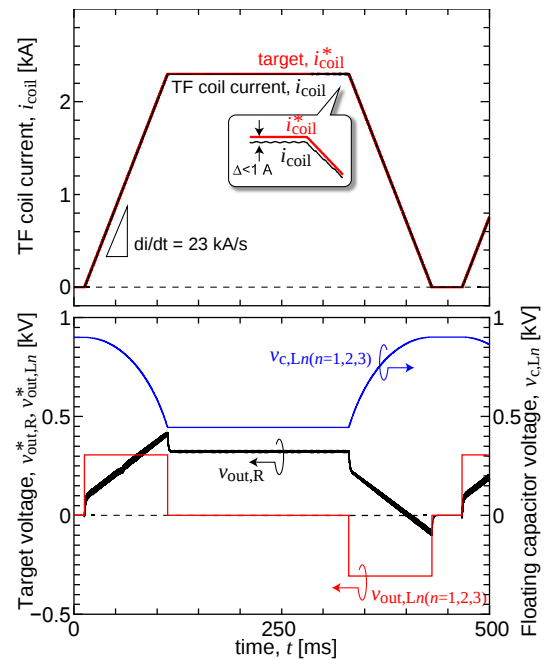


図6 提案マルチレベル変換器の大型トカマクTFコイル放電シミュレーション結果

ギーと磁気エネルギーの移動が行われていることが分かる。またモデル化誤差を補償すべくPI補償器が適切に動作しており、TFコイル電流 i_{coil} は指令値 i_{coil}^* にほぼ完全に追従している。

4. まとめ

本稿では核融合磁場電源を対象としたかご形誘導機によるフライホイール発電機を提案・試作し100 kW、200 ms以上の放電を実証した。また磁場コイル電流の高速立上げに必要な高電圧を変圧器無しで実現するマルチレベル変換器を提案し制御方法とシミュレーションでその効果を検証した。今後は提案マルチレベル変換器のプロトタイプ試作による実験検証を行う予定である。

「参考文献」

- 1) R. Shimada, *et al.*, “Outline of JT-60 power-supply”, HV-82-29 (1982) pp1-7
- 2) 田村、他、「臨界プラズマ試験装置(JT-60)電源の試作開発」、日立評論、pp.87-90(1978).
- 3) F. Bordry, *et al.*, “CERN-PS Main Power Converter Renovation: How to Provide and Control the Large Flow of Energy for a Rapid Cycling Machine”, Particle Accelerator Conference, pp. 3612 – 3614, 2005.
- 4) F. B. C. Fahrni, *et al.*, “A novel 60 MW pulsed power system based on capacitive energy storage for particle accelerators,” EPE , 2007
- 5) 中村、他、「J-PARC・MR 主電磁石電源」、J-PARC電力補償作業部会 報告会(2014)