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×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 為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



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

Shuhei KATO, Masamichi MURAYAMA and Junji KOIDO

<u>— 883</u> —

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 | Ι | 17.9 kgm^2 | |
|-------------------|--------------|--|--|
| Flywheel size | D, H | D=640, H=135 mm | |
| Rated voltage | V | 200 V(L to L, RMS) | |
| Output power | $P_{\rm FW}$ | 100 kW | |
| Standby speed | N | 1500 min ⁻¹ (@50 Hz) | |
| Stored energy | Ε | 220 kJ@ 1500 min ⁻¹ | |
| Mechanical losses | Ploss | $0.45 \text{ kW} @1500 \text{ min}^{-1}$ | |

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 かこ形誘导機によるノフィホイール 発電機のTFコイルへの放電実験結果 ことで、第一章で述べた磁場電源に求められる性 能の一つである「電力系統に影響を与えず磁場コ イルへ大電力放電」を実証した。

2. 絶縁変圧器が不要なマルチレベル変換器 (3・1)提案マルチレベル変換器の従来比較

図4(a)に従来のマルチレベル変換器の構成を示す。従来は時間的に急峻な傾き(di_{coil}/dtが大)の電流を供給するための高電圧は変圧器で絶縁したブリッジ回路(セル)を直列接続して得ていた。一方、図4(b)に提案するマルチレベル変換器の構成を示す。提案方式は直列接続するブリッジ回路の1セルのみにフライホイール発電機からの出力を接続する。残りのブリッジ回路は全て電源が接続されていないフローティングキャパシタとなっているため、絶縁変圧器は不要となる。フローティングキャパシタの直流電圧v_{cLn}(t)は放電が永久に続けば時間的に低下の一途を辿る。しかし、本用途のように磁場コイルへの充放電を繰り返す場合は電流立ち上げ時と電流立ち下げ時で磁気エネルギーがフローティングキャパシタ



図4 従来方式とフローティングキャパシタ 提案方式のマルチレベル変換器構成比較

*C_n*と磁場コイル*L*を行き来するため、フローティ ングキャパシタの電圧*v_{c,Ln}(t)*はある一定の範囲 で充放電と同期して上下する。以下に提案するマ ルチレベル変換器の設計方法と制御方法の詳細 について述べる。

〈3・2〉提案マルチレベル変換器の設計と制御 図4(b)に示した提案するマルチレベル変換器の うちフライホイール発電機から電源供給を受け るブリッジ回路は磁場コイルの抵抗成分Rの電圧 を分担する。一方、電源が接続されていないフロ ーティングキャパシタCnのブリッジ回路は磁場 コイルのインダクタンス成分Lの電圧、即ち L×di_{coll}/dtの電圧を分担する。従って必要な磁 場コイルの電流立上げ要求性能に応じてフロー ティングキャパシタCnのブリッジ回路の直列接 続数nを増減させれば様々な磁場コイルへ対応で きる。

ここでフローティングキャパシタ C_n の静電容 量設計は $v_{c,Ln}(t)$ が放電とともに低下するが磁場 コイル電流がフラットトップ I_{max} に到達した際 に $L \times di_{coil}/dt$ を下回らなければ良い。即ちフロ ーティングキャパシタ C_n に $V_{c,max}$ で初期充電され ている静電エネルギー $C_n V_{c,max}^2$ が磁場コイルの 磁気エネルギー LI_{max}^2 2に移動した際に $v_{c,Ln}(t) > L \times di/dt$ となれば良い。直列接続数n を考慮し式を整理すると必要最低限の C_n は次式 となる。

$$C_n \ge \frac{LI_{\max}^2}{V_{\max}^2 - L^2 (di_{\text{coil}}/dt)^2} \times n \quad \cdot \quad \cdot \quad (1)$$

次に各ブリッジ回路の制御方法について述べる。図5に提案するフローティングキャパシタを 用いたマルチレベル変換器の制御ブロック図を 示す。同図より電源が接続されているブリッジ回 路への電圧指令値は抵抗成分の電圧*Ri*^{*}_{coil}を指令 する。一方、フローティングキャパシタのブリッ ジ回路への電圧指令値は磁場コイル電流指令値 *i*^{*}_{coil}の微分値にインダクタンスLを乗じた値、即ち インダクタンス成分の電圧を直列接続数*n*で等分



図5 抵抗成分とインダクタンス成分を明確 に分離する提案マルチレベル変換器制御方法

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ωcを決定すれば次 式となる。

$$K = \omega_{c} \times L \cdot \cdot \cdot (2)$$
$$T_{i} = L/R \cdot \cdot \cdot (3)$$

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

く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E $V_{c,max}$ 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 $C_n = 115 \text{ mF}$ 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</sub>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

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 | 0.14Ω |
|--------------------------|------------------------|---------------|
| 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 | <i>f</i> _{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)