

燃料電池と電気二重層キャパシタを直列接続した電源をもつ PM モータ駆動システムにおける最適動作点の検討

出水 直人* 山本 吉朗 大寺 史耶
(*鹿児島大学大学院 理工学研究科)

1 はじめに

本研究の目的は、燃料電池(Fuel Cell 以下、FC)を用いた PM モータ駆動システムにおいて、駆動システムの構成と制御方法によって、水素消費を低く抑えることである。筆者らはこれまで FC と電気二重層キャパシタ(Electric Double-Layer Capacitor 以下、EDLC)を直列接続した電源をもつ PM モータ駆動システムの検討を行ってきた^{[1][2]}。本システムは、モータ電力の変動を EDLC に吸収させることにより FC の動作点を任意に操作できる。これまではこの動作点として、FC の発電効率が最大になる点を選択していた。

本稿では、FC の動作点によってチョップパ回路の効率が変化することを考慮に入れ、水素消費が最も少なくなる動作点を選択した。この動作点を用いた可変速運転について、シミュレーションにより検討を行ったので報告する。

2 システム構成

図 1 に回生機能付 FC システムの主回路部を示す。この回路では FC と EDLC が直列接続されており、電流可逆チョップパ 1 (以下、チョップパ 1) と電流可逆チョップパ 2 (以下、チョップパ 2) を介してモータへ電力が供給される。FC 電流 i_{L1} をチョップパ 1 で制御し、直流リンク電圧 e_{dc} をチョップパ 2 で制御する^[3]。これにより、負荷電力の大きさによらず FC 電流 i_{L1} を任意の大きさで流すことができ、FC の動作点を任意に設定できる。このときチョップパ 2 の入力電流である EDLC 充放電電流 i_{L2} は、自然にチョップパ 1 供給電力と負荷電力の過不足電力を補うように流れる。

3 FC の動作点について

本研究でこれまで使用してきた FC の動作点は、水素 1L 当たりの出力エネルギー W_{FC} が最大となる FC 発電効率最大点で、FC の特性試験から得られた図 2 において、FC 電流 i_{L1} が 1.54A となる点である。しかし、FC 発電効率最大点で動作できても、チョップパの運転状態によっては、その発電電力の多くがチョップパ 1 とチョップパ 2 で損失として消費されてしまう場合がある。そこでまず、FC の動作点と、チョップパ 1, 2 の損失の合計 (以下、チョップパ損失) P_{loss} の関係について考えた。

4 チョップパ損失最小点の電流

4.1 チョップパ損失最小点電流の導出

次式はシステム全体の電力の平衡式である。

$$\underbrace{(e_{FC} + e_{DL}) \cdot i_{L1}}_{P_1} + \underbrace{e_{DL} \cdot i_{L2}}_{P_2} - \underbrace{\{(R_{FC} + R_{L1}) \cdot i_{L1}^2 + R_{L2} \cdot i_{L2}^2 + R_{DL}(i_{L1} + i_{L2})^2\}}_{P_{loss}} = P \quad (1)$$

チョップパ 1 および 2 の供給電力 P_1 , P_2 の合計からチョップパ損失 P_{loss} を引いた値を負荷電力 P としている。ここで、チョップパ、インバータの IGBT における損失を簡単のために 0 と

仮定している。この(1)式より、負荷電力 P を供給するための i_{L1} と i_{L2} の組み合わせは無数に存在するが、チョップパ損失 P_{loss} の項に注目すると、 i_{L1} と i_{L2} の最適組み合わせによって、チョップパ損失 P_{loss} を最小にできる動作点があることがわかる。この動作点をチョップパ損失最小点とし、そのときの FC 電流値 i_{L1_min} の導出を行った。

まず(1)式からチョップパ損失 P_{loss} の項

$$P_{loss} = (R_{FC} + R_{L1}) \cdot i_{L1}^2 + R_{L2} \cdot i_{L2}^2 + R_{DL}(i_{L1} + i_{L2})^2 \quad (2)$$

を取り出し、(2)式の i_{L2} に、電力の平衡式を変形した(3)式(本ページ下部参照)を代入する。これにより、チョップパ損失 P_{loss} の式においても、 i_{L1} と i_{L2} のどちらか一方が増加すると他方は電力の平衡を保つように減少する、といった相互の関係が保証される。ここで P_{loss} を(4)式のように i_{L1} で偏微分し、チョップパ損失 P_{loss} を最小にする FC 電流 (以下、チョップパ損失最小点電流) i_{L1_min} の値を求めることができる。

$$f(i_{L1}, P) = \frac{\partial P_{loss}}{\partial i_{L1}} = 0 \quad (4)$$

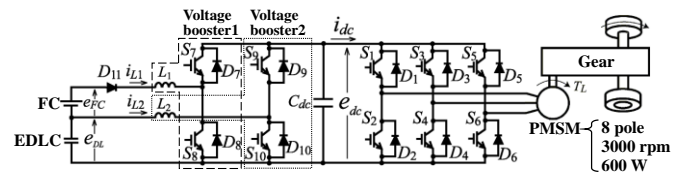


図 1 回生機能付 FC システムの主回路

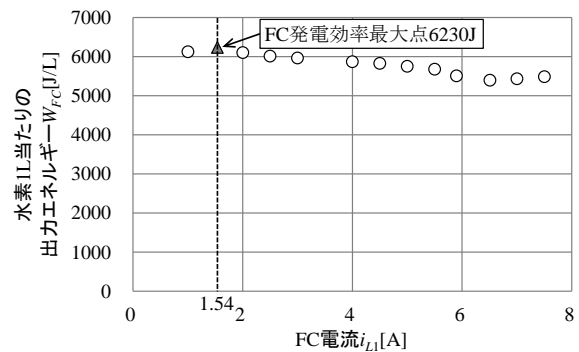


図 2 FC 電流と水素 1L 当たりの出力エネルギーの関係

表 1 チョップパ損失最小点電流の計算に用いた定数

| | |
|---------------------------|---------|
| EDLC 電圧 e_{DL} | 20.0V |
| FC 電圧 e_{FC} | 54.3V |
| EDLC 内部抵抗 R_{DL} | 0.0264Ω |
| FC 内部抵抗 R_{FC} | 2.50Ω |
| インダクタ L_1 内部抵抗 R_{L1} | 0.98Ω |
| インダクタ L_2 内部抵抗 R_{L2} | 0.18Ω |

$$i_{L2}^* = \frac{(e_{DL} - 2R_{DL} \cdot i_{L1}^*) - \sqrt{(e_{DL} - 2R_{DL} \cdot i_{L1}^*)^2 - 4(R_{DL} + R_{L2})\{(R_{FC} + R_{DL} + R_{L1}) \cdot i_{L1}^{*2} - (e_{FC} + e_{DL}) \cdot i_{L1}^*\}}}{2(R_{DL} + R_{L2})} \quad (3)$$

4.2 導出した式の妥当性の検証

数値計算言語 MATLAB を使用し、表 1 の定数を用いて (4) 式の解であるチョップパ損失最小点電流 i_{L1_min} を調べた。例えば負荷電力 $P=200W$ のときは、チョップパ損失最小点電流 i_{L1_min} が 1.28A となった。導出した式の妥当性を検証するために、回路シミュレータ PSIM を用いて、負荷電力 200W においてチョップパ損失最小点電流 $i_{L1_min}=1.28A$ を流した場合と、他の任意の FC 電流 i_{L1} を流した場合のシミュレーション結果を比較した。図 3 に、負荷電力 200W における FC 電流 i_{L1} とチョップパ損失 P_{loss} の関係を示す。同図より、導出したチョップパ損失最小点電流 i_{L1_min} を用いたときにチョップパ損失 P_{loss} を最小にできていることがわかる。

4.3 チョップパ損失最小点電流の近似式の検討

負荷電力 P が 50, 100, 300W のときのそれぞれのチョップパ損失最小点電流 i_{L1_min} についても同様に、(4) 式を用いて MATLAB により図 4 のように求めた。これより近似曲線を描き、近似式

$$i_{L1_min} \approx 0.00668P - 0.0344 \quad (5)$$

を得た。(5) 式を用いれば、任意の負荷電力 P に対し、容易にチョップパ損失最小点電流 i_{L1_min} を得ることができる。

5 FC 発電効率最大点とチョップパ損失最小点の比較検討

0~300W までの任意の負荷電力に対し、従来の FC 発電効率最大点、および本稿で検討したチョップパ損失最小点で FC を動作させた場合に、チョップパ内部抵抗で消費される水素量 h_{loss} [mL/s] を計算し比較した。

計算結果の図 5 より、負荷電力が 236W より大きい範囲では従来の FC 発電効率最大点で運転し、負荷電力が 236W より小さい範囲では今回検討したチョップパ損失最小点で運転した方が、内部抵抗による水素消費を抑えられることがわかる。

動作点による水素消費を比較するために、(a) FC 発電効率最大点、(b) チョップパ損失最小点、(c) チョップパ損失最小

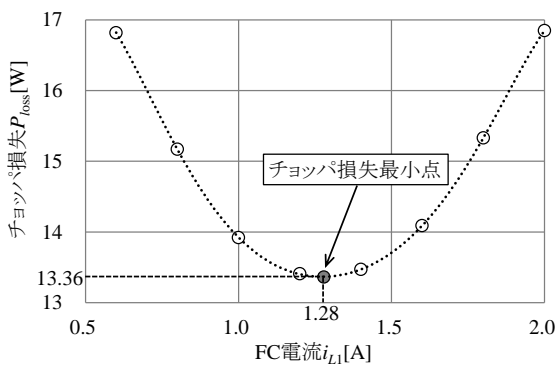


図 3 FC 電流とチョップパ損失の関係 (負荷電力 200W)

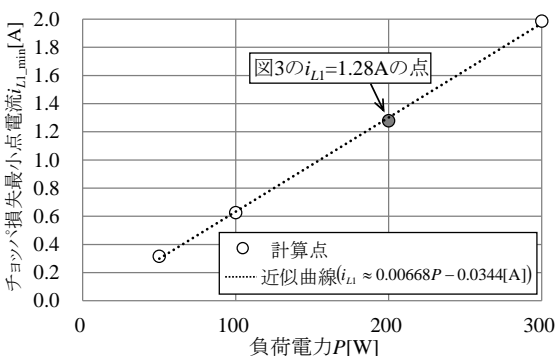


図 4 任意の負荷電力に対するチョップパ損失最小点電流

点(負荷電力<236W)と FC 発電効率最大点(負荷電力>236W)の組み合わせの 3 つの動作点について、負荷電力を 0~300W までランプ状に 3 秒かけて変化させるシミュレーションを行った。

シミュレーション結果より、チョップパ内部抵抗で消費された水素量積算値 H_{loss} [mL] を表 2 にまとめた。表 2 より、(c) を用いたとき内部抵抗による水素消費が 2.12mL となり、(a) と比べて 47% 減、(b) と比べて 25% 減となった。

6 まとめ

本稿ではチョップパ回路の効率が FC の動作点によって変化することを考慮に入れ、まず、負荷電力に対するチョップパ損失最小点電流を導出した。次に、チョップパ内部抵抗で消費される水素量の観点から、従来の FC 発電効率最大点と、本稿で検討したチョップパ損失最小点の比較検討を行った。負荷電力が 236W より小さい範囲では、チョップパ損失最小点を使用し、236W より大きい範囲では FC 発電効率最大点を使用することにより、従来よりもチョップパ内部抵抗における水素消費を抑えられることが明らかとなった。

文献

- [1] 米盛, 山本, 出水, 今給黎:「電気二重層キャパシタにより回生機能を付加した燃料電池駆動電動カートの特性」, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集 14A05-29(2015)
- [2] 出水, 山本, 今給黎:「電気二重層キャパシタにより回生機能を付加した燃料電池駆動電動カートの運転特性」, 平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, 02-2A-05(2015)
- [3] 大寺, 山本, 出水:「燃料電池と電気二重層キャパシタを直列接続した電源をもつ PM モータ駆動システムにおける燃料電池電流応答の改善」, 平成 28 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, 13-1A-09(2016)

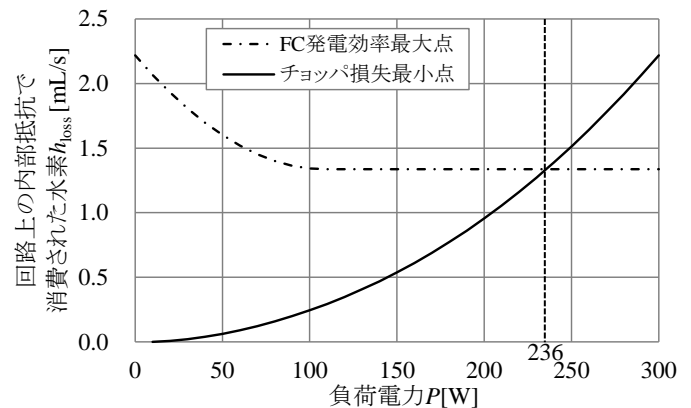


図 5 負荷電力とチョップパ内部抵抗で消費される水素量との関係

表 2 FC の各使用動作点において
チョップパ内部抵抗で消費された水素量積算値

| FC の使用動作点 | チョップパ内部抵抗で消費された水素量積算値 H_{loss} [mL] |
|--|---------------------------------------|
| (a) FC 発電効率最大点 | 4.05 |
| (b) チョップパ損失最小点 | 2.84 |
| (c) チョップパ損失最小点(負荷電力<236W) FC 発電効率最大点(負荷電力>236W) | 2.12 |