

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

大寺史耶* 山本吉朗 出水直人
(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、駆動システムの構成と制御方法によって、燃料電池 (Fuel Cell, 以下 FC とする) の水素消費を低く抑えることである。提案システムでは電気二重層キャパシタ (Electric Double-Layer Capacitor, 以下 EDLC とする) の充放電電流を制御することにより、モータ電力の変動を吸収し、FC 電流を任意に操作できる^{[2][3][4]}。本システムにおいて、FC の動作点と水素消費の間には密接な関係があり、FC 電流を指令通りに流すことは非常に重要である。しかし、これまで、FC 電流を間接的に制御していたため、回路の内部抵抗値が制御プログラム内の値と異なった場合に、FC 電流に誤差が生じていた^{[2][3][4]}。

本発表では、FC 電流を直接制御した場合の制御性能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 1 および電流可逆チョップ 2 を介してモータへ電力を供給する。

2.1 従来制御法 (FC 電流 i_{L1} 間接制御)

従来制御法ではモータの電流制御の状況に応じて、FC 電圧 e_{FC} と EDLC 電圧 e_{DL} の合計 $e_{FC} + e_{DL}$ を電流可逆チョップ 1 により昇圧し、直流リンク電圧 e_{dc} を制御していた。さらに電流可逆チョップ 2 により、EDLC の充放電電流 i_{L2} を制御していた^{[2][3][4]}。この i_{L2} の制御により EDLC を放電または充電させ、モータ電力の変動を吸収し、間接的に FC 電流 i_{L1} を一定に保つ運転ができる。また、モータの回生電力を EDLC に回収できる。

2.2 提案制御法 (FC 電流 i_{L1} 直接制御)

提案制御法では、電流可逆チョップ 1 で FC 電流 i_{L1} を直接制御する。さらに電流可逆チョップ 2 で EDLC 電圧 e_{DL} を昇圧し、直流リンク電圧 e_{dc} を制御する。このとき、EDLC 充放電電流 i_{L2} は自然にモータ電力と電流可逆チョップ 1 の間の過不足電力を補うように流れる。FC 電流 i_{L1} を直接制御することで、回路の内部抵抗値が制御プログラム内の値と異なった場合においても、FC 電流 i_{L1} を指令通りに流すことが可能となる。

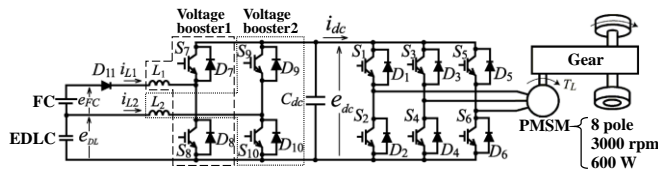


図 1 回生機能付 FC システムの主回路

$$(e_{FC} + e_{DL}) \cdot i_{L1} + e_{DL} \cdot i_{L2} - (R_{FC} + R_{L1}) \cdot i_{L1}^2 - R_{L2} \cdot i_{L2}^2 - R_{DL} (i_{L1} + i_{L2})^2 = P \quad (1)$$

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

3 従来制御法における FC 電流の応答

3.1 ステップ指令による FC 電流の応答

従来制御法における FC 電流 i_{L1} の応答性を調べるために、シミュレーションを行った (図 2)。PM モータの回転速度を 1000 rpm 一定とし、FC 電流の指令値 i_{L1}^* を時刻 2.2s で 1A から 3A にステップ状で変化させている。

シミュレーション結果より、指令値 i_{L1}^* のステップ変化に対して、FC 電流 i_{L1} の応答波形がオーバーシュートしている。

3.2 パラメータが異なる場合の FC 電流の応答

回路のインダクタ抵抗 R_{L1} (0.98Ω) および R_{L2} (0.18Ω) が制御プログラム内の値と異なっている場合、FC 電流 i_{L1} が指令通りに流れないという問題点がある (図 3)。表 1 に各種パラメータを示す。この従来制御法では、(1)式の電力の平衡式から導かれた(2)式を用いて間接的に FC 電流 i_{L1} を制御している。そのため、実際の値が(1)式内の内部抵抗の値と異なると、適切な指令値 i_{L2}^* が計算されず、FC 電流 i_{L1} を指令通りに流せなくなる。

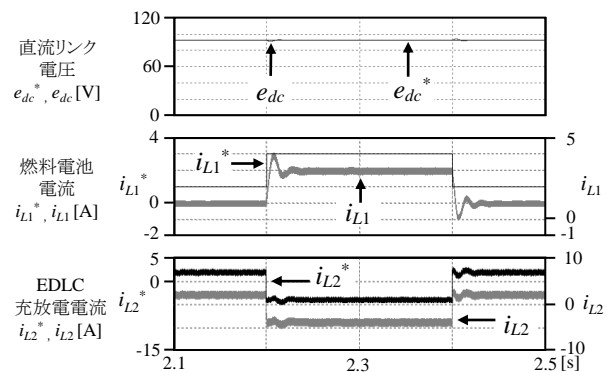


図 2 $R_{L1}=0.98\Omega$, $R_{L2}=0.18\Omega$ の場合の従来制御法における各部波形

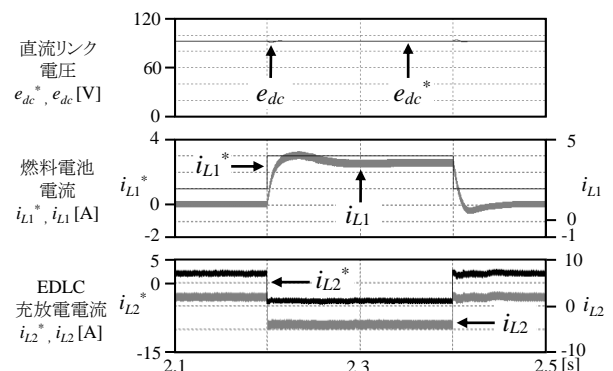


図 3 $R_{L1}=2.94\Omega$, $R_{L2}=0.54\Omega$ の場合の従来制御法における各部波形

表 1 各種パラメータ

FC 電圧	e_{FC}	54.3V
EDLC 電圧	e_{DL}	20.0V
FC の内部抵抗	R_{FC}	2.5Ω
EDLC の内部抵抗	R_{DL}	0.0264Ω
インダクタ L_1 の内部抵抗	R_{L1}	0.98Ω
インダクタ L_2 の内部抵抗	R_{L2}	0.18Ω

4 提案制御法における FC 電流の応答

提案制御法では、(3)式に示す電流可逆チョップ 1 のデューティ式 d_1 に PI 制御を付加することで、FC 電流 i_{L1} を直接制御する。ただし、回路のインダクタ抵抗が制御プログラム内の値と一致している場合は P 制御のみとし、比例ゲイン K_P を 30 に設定している。

4.1 ステップ指令による FC 電流の応答

図 4 に提案制御法におけるシミュレーション結果を示す。図 4 より指令値 i_{L1}^* のステップ変化に対し、EDLC 充放電電流 i_{L2} の波形は振動しているが、FC 電流 i_{L1} は高速に応答していることが確認できる。従来制御法では、FC 電流の指令値 i_{L1}^* によって(2)式の EDLC 充放電電流の指令値 i_{L2}^* が決まる。しかし提案制御法では、FC 電流の指令値 i_{L1}^* によって FC 電流 i_{L1} が直接的に制御されるため、EDLC 充放電電流 i_{L2} は自然に流れることになる。このことから、EDLC 充放電電流 i_{L2} により吸収することで、FC 電流 i_{L1} が指令通りに制御することができる。

4.2 パラメータが異なる場合の FC 電流の応答

従来制御法では、回路のインダクタ抵抗 R_{L1} および R_{L2} が制御プログラム内の値と異なっている場合に、FC 電流が指令通りに流れないという問題点がある。しかし提案制御法では、電流可逆チョップ 1 のデューティ式 d_1 の比例ゲイン K_P 、積分時間 T_I を再調整することにより、図 5 に示すように指令通りの FC 電流 i_{L1} を流すことができる。一例として、インダクタ L_1 および L_2 の内部抵抗 R_{L1} および R_{L2} の値を 3 倍にした場合は、比例ゲイン K_P を 30、積分時間 T_I を 0.01 に設定している。

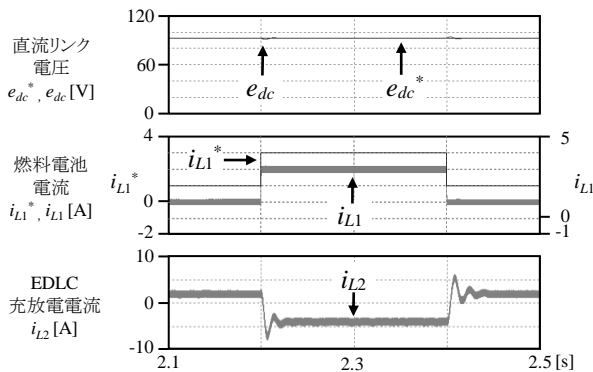


図 4 $R_{L1}=0.98\Omega$, $R_{L2}=0.18\Omega$ の場合の提案制御法における各部波形

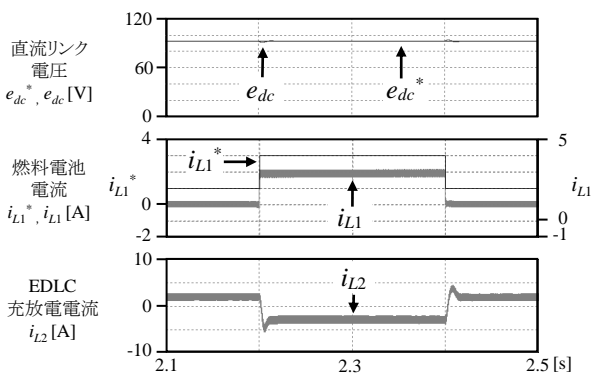


図 5 $R_{L1}=2.94\Omega$, $R_{L2}=0.54\Omega$ の場合の提案制御法における各部波形

5 従来制御法と提案制御法の比較・検討

FC 電流の指令値 i_{L1}^* の制御方式の違いによって、FC 電流 i_{L1} の応答と EDLC 充放電電流 i_{L2} の応答はトレードオフの関係にあるといえる。

従来制御法では、FC の発電効率を最大にする動作点で運転を行っていたため、FC 電流 i_{L1} を一定に保つように制御していた^{[2][3][4]}。したがって、FC 電流の応答性を検討する必要がなく、FC 電流 i_{L1} を間接的に制御しても問題は生じていなかった。

しかし FC の発電効率が最大となる一定の動作点は水素消費が比較的多いため、著者らが FC の水素消費を低く抑える制御を検討し、水素消費を低く抑えるための FC 電流 i_{L1} はモータ電力に応じて変化するという結果に至った^[1]。

よって、運転中に変化するモータ電力に応じて FC 電流の指令値 i_{L1}^* を変化させる運転方式を適応するにあたり、FC 電流の指令値 i_{L1}^* に対する FC 電流 i_{L1} の応答性、正確性がこれまでよりも高く要求されることになる。したがって、FC 電流 i_{L1} を直接制御する提案制御法を用いた方が有利であるものと思われる。

6 まとめ

従来制御法では FC 電流 i_{L1} を電流可逆チョップ 2 により間接的に制御していたため、指令値 i_{L1}^* のステップ変化に対して FC 電流 i_{L1} がオーバーシュートし、応答性が損なわれていた。これに対して、提案制御法では FC 電流 i_{L1} を直接的に制御するため、電流可逆チョップ 1 のデューティ式 d_1 に PI 制御を付加することで、FC 電流の指令値 i_{L1}^* に対して FC 電流 i_{L1} はオーバーシュートすることなく応答させることが可能となる。また、回路の内部抵抗値が制御プログラム内の値と異なっている場合においても、FC 電流 i_{L1} を指令通りに制御できることを示した。

今後は、チョップ回路の効率が FC の動作点によって変化することを考慮に入れ、水素消費が最も少なくなる動作点を検討する。この動作点は刻々と変化するため、本稿で提案した FC 電流 i_{L1} の直接制御を適応する予定である。

文献

- [1] 出水, 山本, 大寺:「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」, 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-10(2016)
- [2] 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)
- [3] 米盛, 山本, 今給黎, 秋山:「回生機能付燃料電池システムを搭載した電動カートの可変速運転」, 平成 26 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会講演論文集, 03-2P-03(2014)
- [4] 米盛, 山本, 今給黎:「燃料電池を電源とする電流可逆チョップ付 PWM インバータによる PM モータの可変速運転」, 平成 26 年電気学会全国大会講演論文集, 4-116(2014)

$$d_1 = 1 - \frac{\{(e_{FC} + e_{DL}) - R_{L1}i_{L1}\} - K_P \left(1 + \frac{1}{T_I}\right) (i_{L1}^* - i_{L1})}{e_{dc}} \quad (3)$$