

応用電力変換工学

第6回 電源技術(電力貯蔵)-IV

平成20年11月05日

燃料電池の効率

- 電気化学効率 $\eta_{id} = \frac{U_{rev}}{U_{id}}$
 - 熱電圧 U_{id} と可逆反応電圧 U_{rev}
- 単セルの電圧効率 $\eta_v(I_{fc}) = \frac{U_{fc}(I_{fc})}{U_{rev}}$
 - U_{fc} は電流に比例して減少
$$U_{fc}(t) = U_{oc} - R_{fc} i_{fc}(t)$$
 - 効率も電流に比例して減少
- ファラデー効率 $\eta_l(\lambda_h) = \frac{I_{fc}}{I_{th}} = \frac{1}{\lambda_h}$
 - 電流理論値に対する実効電流
 - 水素の過剰率 λ_h

燃料電池の効率

- 燃料電池の全体効率

$$\eta_{fc}(I_{fc}) = \eta_V(I_{fc}) \eta_I$$

- 電圧効率と同様の電流依存性
- 電流効率は一定

- システム効率

$$\eta_{st}(I_{fc}) = \frac{P_2(I_{fc})}{NU_{id} I_{fc}}$$

- 補機電力を考慮
- 理論出力に対する実効電力

- スタック効率

$$\eta_{st,tot}(I_{fc}) = \eta_{st}(I_{fc}) \eta_I$$

2008/11/05

応用電力変換工学

3

燃料電池の効率

- セル電流に対する効率

$$P_2(t) = -NR_{fc} I_{fc}(t)^2 + [NU_{oc} - N\kappa_{aux}] I_{fc}(t) - P_0$$

$$\eta_{st}(I_{fc}) = \frac{-NR_{fc} I_{fc}(t)^2 + [NU_{oc} - N\kappa_{aux}] I_{fc}(t) - P_0}{NU_{id} I_{fc}}$$

$$= \eta_{id} \frac{U_{id}}{U_{rev}} \left\{ \frac{-R_{fc} I_{fc}(t)}{U_{id}} + \frac{U_{oc} - \kappa_{aux}}{U_{id}} - \frac{P_0}{NU_{id} I_{fc}} \right\}$$

$$\eta_{st}(I_{fc}) = \eta_{id} \frac{U_{oc}}{U_{rev}} \left(1 - \frac{R_{fc} I_{fc}}{U_{oc}} - \frac{P_0}{U_{oc} I_{fc} N} - \frac{\kappa_{aux}}{U_{oc}} \right)$$

2008/11/05

応用電力変換工学

4

燃料電池の効率

- 効率最大となる出力電流

$$\frac{d}{dI_{fc}} \eta_{st}(I_{fc}) = \eta_{id} \frac{U_{oc}}{U_{rev}} \left(-\frac{R_{fc}}{U_{oc}} + \frac{P_0}{U_{oc} I_{fc}^2 N} \right) = 0$$

$$\frac{R_{fc}}{U_{oc}} = \frac{P_0}{U_{oc} I_{fc}^2 N}$$

$$I_{fc}^2 = \frac{P_0}{R_{fc} N}$$

$$I_{fc, \max} = \sqrt{\frac{P_0}{NR_{fc}}}$$

2008/11/05

応用電力変換工学

5

燃料電池の過渡応答モデル

- PEM燃料電池過渡応答モデル

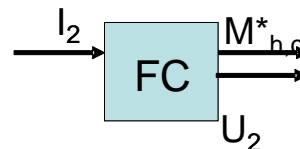
- システムモデル
- 集中定数
- 電気化学, 流体, 熱含む

- 入力変数

- スタック電流 $I_2(t)$

- 出力変数

- スタック電圧 $U_2(t)$
- 燃料消費 $m_{h,c}^*(t)$



2008/11/05

応用電力変換工学

6

燃料電池の過渡応答モデル

- 反応の時定数
 - 流体(水素, 空気) $O(10^{-1}s)$
 - 交換膜 $O(10^0s)$
 - 制御系 $O(10^0s)$
 - スタック温度 $O(10^2s)$

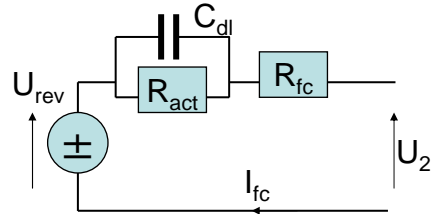
- 電気化学反応
 - 膜・電極界面の電気二重層電荷

- 界面におけるイオン・電子の電荷分離により生じる電荷蓄積

$$\frac{d}{dt} U_{act}(t) = \frac{i_{fc}(t)}{C_{dl}} - \frac{U_{act}(t)}{R_{act} C_{dl}}$$

- 二重層容量 C_{dl}
 - 定常状態の活性化分極 R_{dl}

- 等価回路



2008/11/05

応用電力変換工学

7

燃料電池の過渡応答モデル

- 流路圧力を質量流量の関数として表す
 - カソード流路圧力

$$\frac{d}{dt} p_{ca,in}(t) = \frac{R_a v_{st}}{V_{a,sm}} [m_{a,cp}^*(t) - m_{a,in}^*(t)]$$

$$\frac{d}{dt} p_{ca,out}(t) = \frac{R_a v_{st}}{V_{a,rm}} [m_{a,out}^*(t) - m_{a,rm}^*(t)]$$

- スタック温度 v_{st} は流路温度同じと仮定
 - 空気の気体定数 R_a , 空気供給管の体積 $V_{a,sm}$, 循環供給管の体積 $V_{a,rm}$, 圧縮機による空気の質量流量 $m_{a,cp}^*$, 制御バルブ・膨張器から放出される空気の質量流量 $m_{a,rm}^*$

2008/11/05

応用電力変換工学

8

燃料電池の過渡応答モデル

- 圧縮機の回転速度

$$\frac{d}{dt} \omega_{cp}(t) = \frac{P_{em}(t)\eta_{em} - P_{cp}(t) + P_{ex}(t)}{\Theta_{cp} \omega_{cp}(t)}$$

- 配管の質量流量(配管の慣性)

$$\frac{d}{dt} m^*(t) = \frac{\kappa \Delta p - m^*(t)}{\tau}$$

－ 定常状態の質量流量 $\kappa \Delta p$, 圧力とパイプ長に依存した時定数 τ

2008/11/05

応用電力変換工学

9

燃料電池の過渡応答モデル

- アノード流路圧力

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} p_{ca,in}(t) &= \frac{R_h v_{st}}{V_{h,sm}} [m_{h,c}^*(t) - m_{h,in}^*(t) - m_{h,rec}^*(t)] \\ \frac{d}{dt} p_{an,out}(t) &= \frac{R_h v_{st}}{V_{h,rm}} [m_{h,out}^*(t) - m_{h,rec}^*(t) - m_{h,pur}^*(t)] \end{aligned}$$

－ スタック温度 v_{st} は流路温度同じと仮定
 － 水素の気体定数 R_h , 水素供給管の体積 $V_{h,sm}$, 循環供給管の体積 $V_{h,rm}$

2008/11/05

応用電力変換工学

10

燃料改質器

- 炭化水素系液体燃料を使用するメリット
 - 特殊な貯蔵システムを使用しない
 - 水素を得るまでの技術は確立されている
 - 消費者の受けがよい
- デメリット
 - 結果としてCO₂を排出する
 - 複雑且つコスト高
 - 改質器でエネルギーを消費するため効率低下
 - 改質ガスの純度により、膜の寿命が低下する
 - 改質器を介する分、過渡動作における応答が低下する

2008/11/05

応用電力変換工学

11

燃料改質器

- 炭化水素系燃料
 - ガソリン、軽油、メタノールが有力
- メタノールCH₃OHの利点
 - 種々の再生可能資源より得る事が可能(バイオマス)
 - 天然ガスのメタノール変成が可能
 - 液化天然ガスより良い？
 - 分子構造が簡単なので作りやすい
 - 製造装置が簡単。H₂/CO₂比が高い
 - 直接使用可能な燃料電池もある(DMFC)
- 欠点
 - 専用の供給インフラ整備が必要
 - 腐食に強い配管・タンクが必要
 - 食べたらあかん
 - 燃えても、炎が透明
 - 水に溶ける

2008/11/05

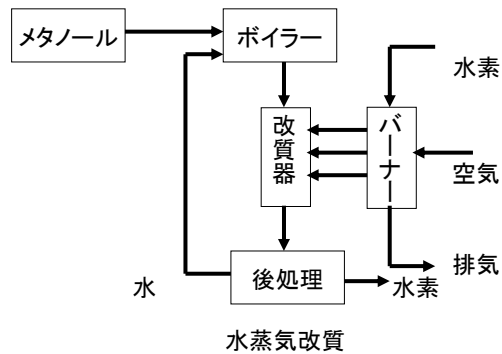
応用電力変換工学

12

燃料改質器

- メタノールの改質法

- 水蒸気改質
 - 最も一般的
- 部分酸化法
- 分解法



2008/11/05

応用電力変換工学

13

燃料改質器

- メタノールの水蒸気改質

- メタノールと水蒸気から, CO_2 と H_2 を生成
 - $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$ $\Delta h_R = 58.4 \text{ kJ/mol}$
- 他の反応
 - 水ガスシフト反応で, CO 生成される
 - $\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$ $\Delta h_R = 97.8 \text{ kJ/mol}$
 - $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ $\Delta h_R = -39.4 \text{ kJ/mol}$

2008/11/05

応用電力変換工学

14

燃料改質器

- 部分酸化法による水蒸気改質
 - メタノールを酸素で直接酸化
 - 全体反応
 - $\text{CH}_3\text{OH} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$ $\Delta h_R = -193\text{kJ/mol}$
 - 部分反応
 - $\text{CH}_3\text{OH} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\Delta h_R = -153.6\text{kJ/mol}$
 - $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ $\Delta h_R = -39.4\text{kJ/mol}$
 - 副生成物としてホルムアルデヒド発生

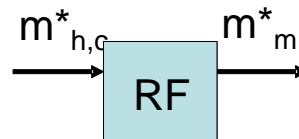
2008/11/05

応用電力変換工学

15

燃料改質器の準定常モデル

- 入力変数
 - 水素の質量流量 $m_{h,c}^*$
- 出力変数
 - メタノールの消費率 m_m^*
- 改質反応はメタノール濃度に比例



2008/11/05

応用電力変換工学

16

燃料改質器の準定常モデル

- 改質器中のメタノール・水素の反応率

$$dn_m^* = -[k_1 C_m(x) + k_2] dm_c = -n_m^*(0) dx$$

$$dn_h^* = [3k_1 C_m(x) + 2k_2] dm_c$$

- 反応率係数 k_1, k_2 (温度・圧力の関数), メタノールのモル濃度 $C_m(x)$, メタノール変換比 x , 触媒床の質量 $m_c(x)$

- メタノールのモル濃度

$$C_m(x) = [1 - x] \frac{1 + \sigma}{1 + \sigma + 2x} C_m(0)$$

- 供給ガスの蒸気-メタノール比 σ (0.67~1.5), メタノールの初期濃度 $C_m(0)$

2008/11/05

応用電力変換工学

17

燃料改質器の準定常モデル

- 反応率 x に必要な触媒床の質量 $m_c(x)$

$$dm_c = \frac{n_m^*(0)}{k_1 C_m(x) + k_2} dx$$

$$m_c(x) = \int_0^x \frac{n_m^*(0)}{k_1 C_m(\xi) + k_2} d\xi = \int_0^x \frac{n_m^*(0)}{k_1 [1 - \xi] \frac{1 + \sigma}{1 + \sigma + 2\xi} C_m(0) + k_2} d\xi$$

$$m_c(x) = n_m^*(0) \left[c_1 \log_e \frac{c_2}{c_2 - c_3 x} - c_4 x \right]$$

$$U = 1 + \sigma \quad c_2 = U[k_1 C_m(0) + k_2] \quad c_3 = U k_1 C_m(0) - 2k_2$$

$$c_1 = \frac{U c_3 + 2c_2}{c_3^2}$$

$$c_4 = \frac{2}{c_3}$$

2008/11/05

応用電力変換工学

18

燃料改質器の準定常モデル

- 水素の反応率

$$n_h^*(x) = n_m^*(0) \int_0^x \frac{3k_1 C_m(\xi) + 2k_2}{k_1 C_m(\xi) + k_2} d\xi$$

$$= 3x n_m^*(0) - k_2 m_c(x)$$

- 水素生成率は理論値 $3n_m^*(0)$ よりCO生成成分 $k_2 m_c(x)$ 少ない

$$n_h^*(x) = \frac{m_{hc}^*}{M_h}$$

- 水素のモル質量 M_h (32kg/mol)

2008/11/05

応用電力変換工学

19

燃料改質器の準定常モデル

- メタノールの初期濃度 $C_m(0)$

$$C_m(0) = \frac{n_m^*(0)}{1+U} \frac{p_{ref}}{R v_{ref}}$$

- 気体定数 R , 改質器圧力 p_{ref} (1～3bar), 改質器温度 v_{ref} (430～570K)

- 消費するメタノールの質量流量

$$m_m^* = n_m^*(0) M_m$$

- 水素のモル質量 M_h (32kg/mol)

2008/11/05

応用電力変換工学

20

燃料改質器効率

- 燃料改質器の効率を定義するのは難しい
 - アノード排気は水蒸気改質反応に必要な熱の一部を供給
 - 水素過剰率を λ_h 排気燃焼の指標に用いる
 - 燃料電池利用率 η_l

$$\eta_l(t) = \frac{m_{h,r}^*(t)}{m_{h,c}^*(t)} = \frac{1}{\lambda_h(t)}$$
 - 出力化学パワーに対する全入力パワーとすると
 - メタノールのパワー+外部注入パワー

2008/11/05

応用電力変換工学

21

燃料改質器効率

- 外部注入パワーはメタノールの質量流量に比例すると仮定
 - 比例定数 κ_{ref}

$$P_{ref}(t) = \kappa_{ref} m_m^*(t)$$
- 外部注入パワーのうち μ が回収エネルギーとした場合の改質器効率

$$\eta_{ref}(t) = \frac{m_{h,c}^*(t) H_h}{m_m^*(t) H_m + [1 - \mu] \kappa_{ref} m_m^*(t)}$$
 - 水素の低位発熱量 H_h (120MJ/kg), メタノールの低位発熱量 H_m (19.9MJ/kg)

2008/11/05

応用電力変換工学

22

燃料改質器効率

- 変換比 x を用いて効率を表すと

$$\eta_{ref}(t) = \frac{H_h M_h}{M_m} \frac{3x - k_2 \left[c_1 \log_e \frac{c_2}{c_2 - c_3 x} - c_4 x \right]}{H_m + [1 - \mu] K_{ref}}$$

- 燃料改質器効率を考慮した燃料電システム全体の効率

$$\eta_{fcr} = \eta_{st} \eta_I \eta_{ref}$$

2008/11/05

応用電力変換工学

23

燃料改質装置の動的モデル

- 入力変数
 - 水素の質量流量
- 改質器応答, 蒸発器, 過熱器, ガス浄化段を二次式で近似する

$$\tau^2 \frac{d^2}{dt^2} n_h^*(t) + 2\tau \frac{d}{dt} n_h^*(t) + n_h^*(t) = 3x \frac{m_m^*(t)}{M_m} - km_c(x)$$

- プロセスの時定数 τ

2008/11/05

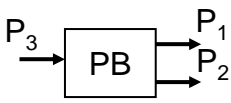
応用電力変換工学

24

機器の電氣的接続のモデル化

- 準定常状態におけるパワーの関係

- パワーのバランス

$$P_{m+1}(t) = \sum_{j=1}^m P_j(t) - P_l(t)$$


- 入力電力 $P_{m+1}(t)$, 電源パワー $P_j(t)$, 電気負荷 $P_l(t)$

- 電力分配比 $u_j(t) = \frac{P_j(t)}{P_{m+1}(t) + P_l(t)}$

$$P_j(t) = u_j(t) [P_{m+1}(t) + P_l(t)] \quad j = 1, \dots, m-1$$

$$P_m(t) = \left[1 - \sum_{j=1}^{m-1} u_j(t) \right] [P_{m+1}(t) + P_l(t)]$$

2008/11/05

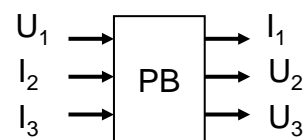
応用電力変換工学

25

機器の電氣的接続 動的モデル

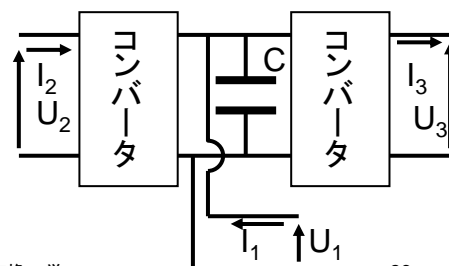
- 入力変数

- 主ポート電圧 $U_1(t)$
 - 他のポート電流 $I_j(t)$



- 出力変数

- 主ポート電流 $I_1(t)$
 - 他のポート電圧 $U_j(t)$



2008/11/05

応用電力変換工学

26

機器の電氣的接続 動的モデル

- 直流コンデンサの過渡応答
 - パワーフロー的には無視可能

- コンバータ入出力関係

- 電圧(母線電圧 U_1 基準)

$$U_j(t) = R_j U_1(t) \quad j = 2, 3, \dots, m+1$$

- 昇降圧比 R_j

- 電流

$$I_1(t) = R_{m+1}(t)I_{m+1}(t) - \sum_{j=2}^{m+1} R_j I_j(t) + \frac{P_l(t)}{U_1(t)}$$

2008/11/05

応用電力変換工学

27