

応用電力変換工学

第5回 電源技術(電力貯蔵)-IV

平成20年10月29日

おわび

- 小久見 善八 先生の本によると
 - 電位の高い方の電極を正極(positive electrode)
 - 電位の低い方の電極を負極(negative electrode)
 - 放電時
 - 正極でカソード反応(cathodic reaction:還元反応)
 - 負極でアノード反応(anodic reaction:酸化反応)
 - 充電時
 - 正極で酸化反応
 - 負極で還元反応
 - 電池の正極と負極をカソード(陰極)とアノード(陽極)と呼ぶのは誤り

水素燃料電池の熱力学

- エンタルピーHとエントロピーS (RTP:298K)
 - H₂(気体)
 - H=0 MJ/kmol S=130.6 kJ/(kmol K)
 - O₂(気体)
 - H=0 MJ/kmol S=205.0 kJ/(kmol K)
 - H₂O(気体)
 - H=-241.8 MJ/kmol S=188.7 kJ/(kmol K)
- H₂Oの生成
 - エントロピー変化
 - 130.6 + 205.0/2 - 188.7 = 44.4 kJ/(kmol K)
 - 放出熱量
 - Q_s = 298 × 44.4 = 13.2 MJ/kmol

2008/10/29

応用電力変換工学

3

水素燃料電池の熱力学

- 一定温度における可逆反応
 - エネルギーバランス
$$-W_{rev} - Q_S = \Delta H$$
$$W_{rev} = -\Delta H - Q_S = -\Delta H + v\Delta S = -\Delta G$$
 - W_{rev}:仕事
 - G:ギブスの自由エネルギー(等温等圧過程)
$$G = H - v\Delta S$$
$$W_{rev} = Q_H - Q_S$$
- W_{rev}が燃料電池から取り出せる最大の仕事
 - 全ての発熱量が使えるわけではない

2008/10/29

応用電力変換工学

4

水素燃料電池の熱力学

- 燃料電池セルの理論最大効率
 - 電気化学カルノー効率
 - 可逆反応の最大仕事と担体の発熱量の比

$$\eta_{id} = \frac{-\Delta G}{-\Delta H} = \frac{-\Delta H + v\Delta S}{-\Delta H} = 1 - \frac{v\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{Q_s}{Q_h}$$

2008/10/29

応用電力変換工学

5

水素燃料電池の熱力学

- 反応物の単位量に対する仕事とセル電圧
 - 仕事Wとセル電圧U_{fc}の関係

$$W = n_e q N_0 U_{fc} = n_e F U_{fc}$$

- 水素1kmol中の自由電子数n_e
- 単位電荷q
- 1kmol中の分子数N₀=アボガドロ数×1k=6.022×10²⁶
- フラデー定数F=qN₀=96.48×10⁶ C/kmol

2008/10/29

応用電力変換工学

6

水素燃料電池の熱力学

- セル反応が可逆の場合
 - 仕事 W_{rev} とセル電圧 U_{rev} の関係

$$W_{rev} = n_e q N_0 U_{rev} = n_e F U_{rev} = -\Delta G$$

- セル電圧 U_{rev}

$$U_{rev} = -\frac{\Delta G}{n_e F}$$

- 水が気体で生成させる場合
 - 仕事 $W_{rev} = 228.6 \text{ MJ/kmol}$
 - セル電圧 $U_{rev} = 1.185 \text{ V}$
- 水が液体で生成させる場合(高位発熱量)
 - 仕事 $W_{rev} = 273.2 \text{ MJ/kmol}$
 - セル電圧 $U_{rev} = 1.231 \text{ V}$

2008/10/29

応用電力変換工学

7

水素燃料電池の熱力学

- 熱電圧 U_{id}
 - 全エンタルピーが電気エネルギーに変換された場合
 - 不可能 $U_{id} = -\frac{\Delta H}{n_e F}$
 - 熱電圧 U_{id} と可逆反応電圧 U_{rev} の関係
$$U_{rev} = \eta_{id} U_{id}$$
- 負荷電圧は可逆電圧より低くなる
 - 損失電力 $P_l(t)$
$$P_l(t) = I_{fc}(t) [U_{id} - U_{fc}(t)]$$
 - 負荷電流 $I_{fc}(t)$
 - 損失は熱になる

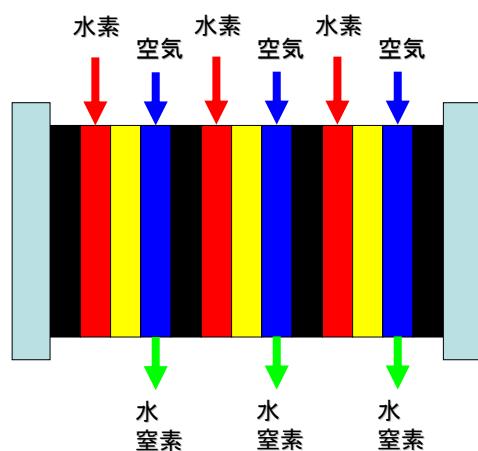
2008/10/29

応用電力変換工学

8

燃料電池システム

- PEMセルの構造
 - 膜電極配置(MEA: Membrane-electrode arrangement)
 - イオン交換膜
 - 触媒層
 - 多孔質電極(拡散層)
- セルを直列接続したスタッツ構造

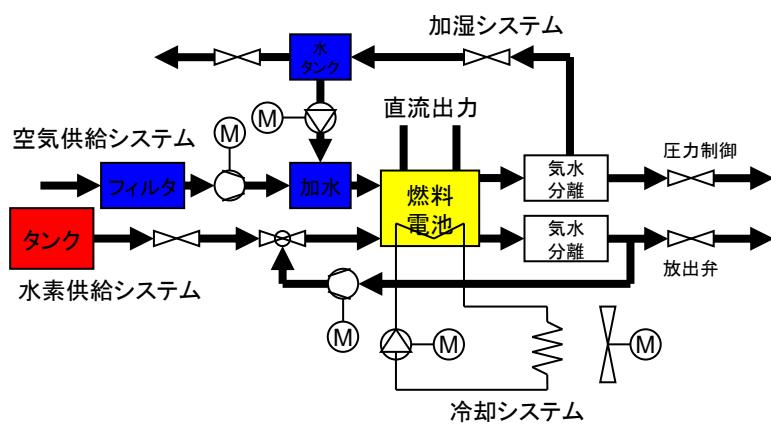


2008/10/29

応用電力変換工学

9

燃料電池システム

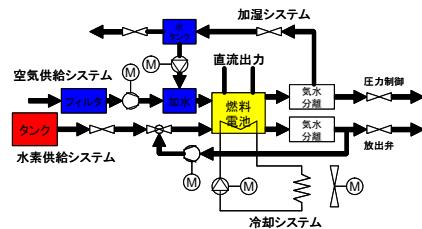


2008/10/29

応用電力変換工学

10

燃料電池システム



- 基本構成(燃料改質装置を含まない場合)
 - 水素供給システム
 - 空気供給システム
 - 水システム
 - 冷却システム
 - 加湿システム

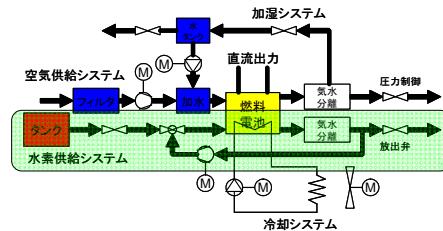
2008/10/29

応用電力変換工学

11

燃料電池システム

- 水素供給システム
 - 貯蔵装置からセル(アノード)に水素を供給
 - 圧縮タンク
→圧力調整弁
(大気圧基準)
→セル(アノード)
→排気
(バルブで調整)



2008/10/29

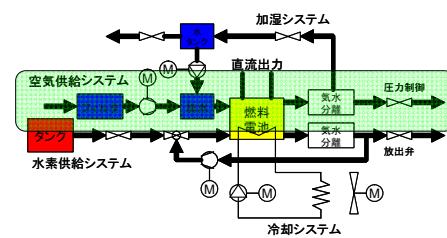
応用電力変換工学

12

燃料電池システム

- 空気供給システム

- 湿度の高い、清浄な空気をセル(カソード)に供給
- 大気
→圧縮機加圧(70kPa)
→加湿
→セル(カソード)
→排気(バルブで調整)



2008/10/29

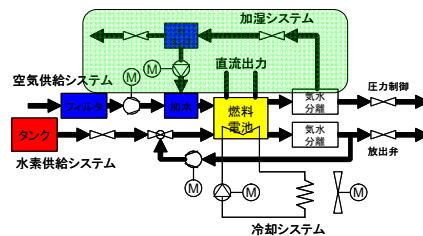
応用電力変換工学

13

燃料電池システム

- 加湿システム

- PEM燃料電池は湿度に敏感
 - 反応物の流量・水分運搬能力大
- 水注入による加湿
 - チャンバー内で液体噴射・冷却
- 燃料電池排気中には水滴・水蒸気が含まれる
 - 汽水分離
- リザーバで水分凝縮・収集
 - 注入システム・冷却システムに供給



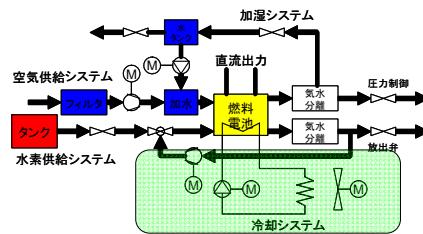
2008/10/29

応用電力変換工学

14

燃料電池システム

- 冷却システム
 - 冷却対象
 - 燃料電池
 - 付帯設備
 - 圧縮機用モータ等
 - 構成
 - 放熱器(ラジエター)
 - ファン
 - 冷媒ポンプ
 - モーター駆動とすることにより、負荷状態に応じて回転数調整。省エネ
 - 水タンク
 - 脱イオン化器
 - 脱イオン水とすることで、加湿システムと水を共用可能

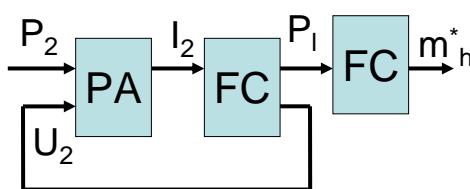


2008/10/29

応用電力変換工学

15

燃料電池準定常状態モデル



- 入力変数
 - 端子出力電力 $P_2(t)$
- 出力変数
 - 水素消費量 $m_h^*(t)$
- 内部変数
 - 端子電圧 $U_2(t)$
 - 端子電流 $I_2(t)$

2008/10/29

応用電力変換工学

16

燃料電池準定常状態モデル

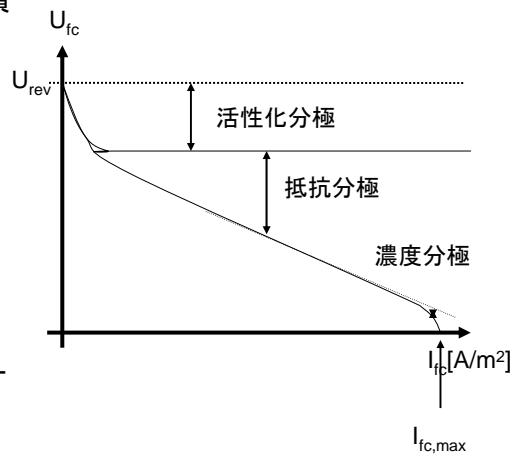
- セル電流 $I_{fc}(t)$ を、単位面積の電流密度 $i_{fc}(t)$ で考える

$$i_{fc}(t) = \frac{I_{fc}(t)}{A_{fc}}$$

- A_{fc} :セル面積

- 分極特性

- 燃料電池セル電圧 $U_{fc}(t)$ と電流 $i_{fc}(t)$
- 分圧、湿度、温度をパラメータ



2008/10/29

応用電力変換工学

17

燃料電池準定常状態モデル

- セル電圧 $U_{fc}(t)$ は平衡電位 U_{rev} から過電圧・分極等の不可逆損失を差し引いたもの
 - 活性分極 $U_{act}(t)$
 - 抵抗分極 $U_{ohm}(t)$
 - 濃度分極 $U_{conc}(t)$

$$U_{fc}(t) = U_{rev} - U_{act}(t) - U_{ohm}(t) - U_{conc}(t)$$

- 可逆セル電位 U_{rev}

- セル温度、反応物質・生成物質分圧に依存
 - セル電流には依存しない
 - ネルンストの式で表される

2008/10/29

応用電力変換工学

18

燃料電池準定常状態モデル

- 活性分極 $U_{act}(t)$

- 反応を開始するのに必要なエネルギー

- 触媒の種類に依存(良い触媒ほど小さい)
 - カソード反応で律速される
 - 電流密度と共に損失増加
 - Tafelの式(実験式)で表される

$$U_{act}(t) = c_0 + c_1 \ln[i_{fc}(t)]$$

- c_0, c_1 : 温度依存性の係数。 c_0 は反応物質の分圧にも依存
 - 極小電流での誤差大。Tafelの近似式(実験式)

$$U_{act}(t) = c_0 \left[1 - e^{-c_1 i_{fc}(t)} \right]$$

- c_0, c_1 : 反応物質の分圧とセル温度に依存
 - 或る電流密度を超えると活性分極はほぼ一定となる

2008/10/29

応用電力変換工学

19

燃料電池準定常状態モデル

- 抵抗分極 $U_{ohm}(t)$

- 流れに対する損失

- イオン交換膜
 - 触媒層
 - 電極中の電子の通過
 - オームの法則で記述

$$U_{ohm}(t) = i_{fc}(t) \tilde{R}_{fc}(t)$$

- ただし, $\tilde{R}_{fc}(t) = R_{fc}(t) A_{fc}$
 - 電子・膜・電極の接触抵抗も含む
 - 膜抵抗が支配的
 - 電流密度の非線形な影響は無視可能

2008/10/29

応用電力変換工学

20

燃料電池準定常状態モデル

- 濃度分極 $U_{conc}(t)$

- 電極において、反応により反応物質濃度が変化することで生じる損失

- 大電流密度動作での影響大

$$U_{conc}(t) = c_2 i_{fc}(t)^{c_3}$$

- c_2, c_3 : 温度と反応物質分圧に依存する係数

- 別モデル

$$U_{conc}(t) = c_2 e^{c_3 i_{fc}(t)}$$

2008/10/29

応用電力変換工学

21

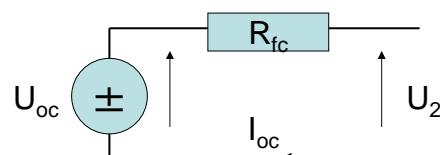
燃料電池準定常状態モデル

- 線形モデル

- 低電流領域を除いたモデル

$$U_{fc}(t) = U_{oc} - R_{fc} i_{fc}(t)$$

- U_{oc} は線形近似の切片。 U_{rev} とは異なる



2008/10/29

応用電力変換工学

22

燃料電池準定常状態モデル

• 燃料電池システム

- スタック構成

- 単セルをN段重ねて出力電圧を高くる
$$U_2(t) = N U_{fc}(t)$$

- 燃料電池スタックの出力電力

$$P_{st}(t) = I_{fc}(t) U_{fc}(t) N$$

- 出力電力は、負荷電力 $P_2(t)$ と補機電力 $P_{aux}(t)$ の和

$$P_2(t) = P_{st}(t) - P_{aux}(t)$$

- 補機電力

$$P_{aux}(t) = P_0 + P_{em}(t) + P_{ahp}(t) + P_{hp}(t) + P_{cl}(t) + P_{cf}(t)$$

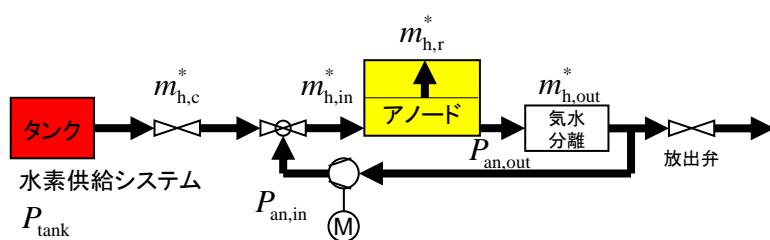
- $P_{em}(t)$ 圧縮機モータ, $P_{hp}(t)$ 水素ポンプ, $P_{ahp}(t)$ 加湿機水循環ポンプ, $P_{cl}(t)$ 冷却水ポンプ, $P_{cf}(t)$ 冷却ファンモータ, P_0 バイアス電力(燃料電池の出力維持)

2008/10/29

応用電力変換工学

23

水素供給システム



- | | |
|----------------------------|---------------------|
| • タンクからの水素質量流量 $m_{h,c}^*$ | • タンク圧力 P_{tank} |
| • 入口水素質量流量 $m_{h,in}^*$ | • 入口圧力 $P_{an,in}$ |
| • 出口水素質量流量 $m_{h,out}^*$ | • 出口圧力 $P_{an,out}$ |
| • 燃料電池反応質量流量 $m_{h,r}^*$ | |

2008/10/29

応用電力変換工学

24

水素供給システム

- 出力電流密度 $I_{fc}(t)$ は電子流量 $n_e^*(t)$ で決まる
 - $n_e^*(t)$ はモル流量 $n_h^*(t)$ と電離の係数 n_e で与えられる
 - 水素では $n_e=2$
 - $$n_e^*(t) = n_h^*(t)n_e$$
$$I_{fc}(t) = n_h^*(t)n_e q N_0 = n_h^*(t)n_e F$$
 - F : ファラデー定数, q : 単位電荷, N_0 : アボガドロ定数

2008/10/29

応用電力変換工学

25

水素供給システム

- 水素の質量流量 m_h^* は、モル流量 $n_h^*(t)$ より得られる
 - M_h : 水素のモル質量
 - $$n_h^*(t) = \frac{I_{fc}(t)}{n_e F}$$
$$m_{h,r}^*(t) = M_h n_h^*(t) = \frac{I_{fc}(t) M_h}{n_e F}$$
 - セル数 N のスタックの場合

$$m_{h,r}^*(t) = \frac{N I_{fc}(t) M_h}{n_e F}$$

2008/10/29

応用電力変換工学

26

水素供給システム

- 水素供給システムは過剰の水素を供給する
 - 過渡応答改善
 - 燃料電池入り口の水素質量流量

$$m_{h,in}^*(t) = \lambda_h(t) \frac{NI_{fc}(t)M_h}{n_e F} = \lambda_h(t) \kappa_h I_{fc}(t)$$

$$\kappa_h = \frac{NM_h}{n_e F}$$

- 過剰率 $\lambda_h(t)$

– 水素タンク側のバルブで調整

2008/10/29

応用電力変換工学

27

水素供給システム

- 燃料電池入り口の水素質量流量
 - 水素タンクからの水素質量流量 $m_{h,c}^*(t)$
 - 再循環系からの水素質量流量 $m_{h,rec}^*(t)$
- $m_{h,in}^*(t) = m_{h,rec}^*(t) + m_{h,c}^*(t)$
- 再循環系の水素質量流量はアノード出口と異なる
 - 不純物蓄積を防ぐ定期的なバージ処理
- $m_{h,rec}^*(t) = m_{h,out}^*(t) - m_{h,pur}^*(t)$

- 燃料電池出口水素質量流量

$$m_{h,out}^*(t) = m_{h,in}^*(t) - m_{h,r}^*(t) = [\lambda_r(t) - 1] \kappa_h I_{fc}(t)$$

2008/10/29

応用電力変換工学

28

水素供給システム

- 水素質量流量は燃料電池セル出入口間の圧力($P_{an,in}(t), P_{an,out}(t)$)差に依存
 - 反応ガスを電極に運ぶ流れの場に関係
 - ガス流路用溝(0.5mm間隔)付炭素系複合材料電極
 - 仮定:層流, セル反応による一様な質量除去
 - 質量流量と圧力降下の線形関係で表される
- $$m_{h,in}^*(t) = K_h [p_{an,in}(t) - p_{an,out}(t)] + \frac{1}{2} m_{h,r}^*(t)$$

2008/10/29

応用電力変換工学

29

水素供給システム

- タンクからの質量流量, タンク圧力とセル入口圧力との関係
 - バルブ開度 $\xi_h(t)$
$$p_{an,in}(t) = p_{tank} - \xi_h(t) m_{h,c}^*(t)^2$$
 - 再循環質量流量とセル出入口圧力の関係は水素循環ポンプに依存
 - 準定常状態のポンプ特性
 - ポンプ圧力比
- $$f_{hp}(\omega_{hp}(t), m_{h,rec}^*(t), \Pi_{hp}(t)) = 0$$
- $$\Pi_{hp}(t) = \frac{p_{an,in}(t)}{p_{an,out}(t)}$$

2008/10/29

応用電力変換工学

30

水素供給システム

- ポンプパワー

$$P_{hp}(t) = m_{h,rec}^*(t) c_{p,h} \nu_{fc} \left[\Pi_{hp}(t)^{\frac{\gamma_h - 1}{\gamma_h}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_{ph} \eta_{em}}$$

– η_{em} :モータ効率, η_{hp} :ポンプ効率, $c_{p,h}$:水素の比熱

– 近似 $P_{hp}(t) \approx \frac{m_{h,rec}^*(t)}{\rho_h \eta_{ph} \eta_{em}} [p_{an,in}(t) - p_{an,out}(t)]$

– ρ_h :水素の平均質量濃度

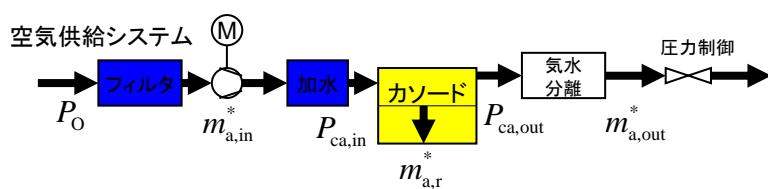
– 圧力差に対する近似 $P_{hp}(t) = \kappa_{hp} I_{fc}(t)^2$

2008/10/29

応用電力変換工学

31

空気供給システム



- 水素と反応する酸素の質量流量は電気化学で求まる

– 水素1mol, 酸素0.5mol

• 反応に必要な空気のモル流量

$$n_o^*(t) = \frac{1}{2} n_h^*(t)$$

• 燃料電池出力電流で表した空気の質量流量

$$m_{a,r}^*(t) = \frac{NI_{fc}(t)M_o}{2n_e F}$$

2008/10/29

応用電力変換工学

32

空気供給システム

- 空気供給システムは過剰の空気を供給する

- 過剰率 $\lambda_a(t) > 1$

- 有効空気質量流量

- 空気の酸素含有率21%

$$m_{a,in}^*(t) = \lambda_a(t) \frac{NI_{fc}(t)M_h}{2n_e F} \frac{100}{21} = \lambda_a(t) \kappa_a I_{fc}(t)$$
$$\kappa_a = \frac{NM_h}{2n_e F} \frac{100}{21}$$

- 空気供給システムの質量流量と圧力降下

- カーソード流路の層流を仮定

$$m_{a,in}^*(t) = K_a(t) [p_{ca,in}(t) - p_{ca,out}(t)] + \frac{1}{2} m_{o,r}^*(t)$$

2008/10/29

応用電力変換工学

33

空気供給システム

- 空気の質量流量とセル入口圧力の関係は空気圧縮機に依存

- 準定常状態の圧縮機特性

$$f_{cp}(\omega_{cp}(t), m_{a,in}^*(t), \Pi_{cp}(t)) = 0$$

- 圧縮機圧縮比

$$\Pi_{cp}(t) = \frac{p_{ca,in}(t)}{p_o}$$

- 圧縮機パワー

$$P_{cp}(t) = m_{a,in}^*(t) c_{p,a} v_a \left[\Pi_{cp}(t)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right] \frac{1}{\eta_{cp}}$$

- η_{cp} : 圧縮機効率, v_a : 空気温度

2008/10/29

応用電力変換工学

34

空気供給システム

- セル出口における残留空気質量流量

$$m_{a,out}^*(t) = m_{a,in}^*(t) - m_{o,r}^*(t)$$

- セル出口圧力、大気圧とセル出力質量流量の関係

- 圧力バルブ開度 $\xi_a(t)$

$$p_{ca,out}(t) - p_o = \xi_a(t) m_{a,out}^*(t)^2$$

2008/10/29

応用電力変換工学

35

空気供給システム

- 膨張器により排気のエンタルピーを回収(圧力バルブの代わりに使用)

- 膨張器特性

$$f_{ex}(\omega_{cp}(t), m_{a,out}^*(t), \Pi_{ex}(t)) = 0$$

- 膨張比 $\Pi_{ex}(t) = \frac{p_{ca,out}(t)}{p_o}$

- 膨張器で回収するパワー

$$P_{ex}(t) = m_{a,out}^*(t) c_{p,a} V_{fc} \left[1 - \Pi_{ex}(t)^{-\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} \right] \frac{1}{\eta_{ex}}$$

- η_{ex} :膨張器効率(低い)
- 利用可能なエンタルピーも小さい。
- 排気の組成が変わるので比熱 $c_{p,a}$ も変わる

2008/10/29

応用電力変換工学

36

空気供給システム

- 定常状態における圧縮機、膨張器、モータ等のパワーの関係

$$- P_{cp}(t) + P_{ex}(t) + P_{em}(t)\eta_{em} = 0$$

- η_{em} : モータ効率

- 空気供給システムの制御

- 空気の過剰供給率、カソード圧力一定

- 圧縮機圧縮比一定と等価

- 圧力バルブまたは圧縮機パワーの制御

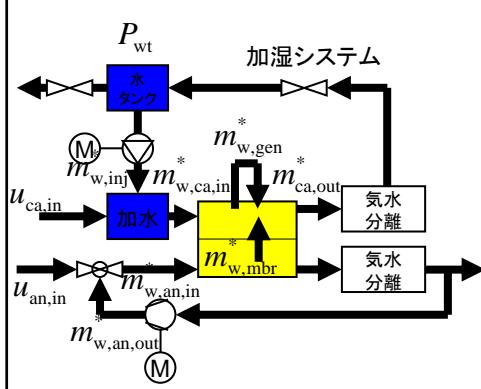
$$P_{em}(t) = \kappa_{cp} I_{fc}(t)$$

2008/10/29

応用電力変換工学

37

加湿システム



- イオン交換膜の脱水(乾燥)を防ぐ
 - 供給空気を加湿
 - 加湿による空気冷却効果
 - 場合によっては水素も加湿
 - イオン交換膜からの水分の拡散も有り
 - 水分を与えすぎると水によるfloodingが発生

2008/10/29

応用電力変換工学

38

加湿システム

- カソード入口の水分質量流量 $m_{w,ca,in}^*(t)$

$$m_{w,ca,in}^*(t) = u_0 m_{a,in}^*(t) + m_{w,inj}^*(t)$$

– 空気の質量流量 $m_{a,in}^*(t)$, 水分含有率(質量): u_0 , 注入水質量流量 $m_{w,inj}^*(t)$

- カソード入口の湿度

$$u_{ca,in}(t) = \frac{m_{w,ca,in}^*(t)}{m_{a,in}^*(t)}$$

- カソード出口の水分質量流量 $m_{w,ca,out}^*(t)$

$$m_{w,ca,out}^*(t) = m_{w,ca,in}^*(t) + m_{w,gen}^*(t) + m_{w,mbr}^*(t)$$

– 生成水分の質量流量 $m_{w,gen}^*(t)$, 膜に拡散する水分の質量流量 $m_{w,mbr}^*(t)$

- カソード出口の湿度

$$u_{ca,out}(t) = \frac{m_{w,ca,out}^*(t)}{m_{a,out}^*(t)}$$

2008/10/29

応用電力変換工学

39

加湿システム

- 水の生成率とセルでの反応の関係

$$m_{w,gen}^*(t) = m_{h,r}^*(t) \frac{M_w}{M_h}$$

– 水のモル質量 M_w , 水素のモル質量 M_h

- イオン交換膜中の水の移動

– 電気浸透抗力(electro-osmotic drag)現象

- 水素イオンのアノードからカソードへの移動に, 水分子が引っ張られる

– カソードからアノードへの水分の逆拡散

- 膜中の水分濃度勾配

- 膜にかかる水の分圧の勾配

– 膜は薄い(50um)ので勾配は一定と仮定できる

2008/10/29

応用電力変換工学

40

加湿システム

- 膜中を移動する水分の質量流量 $m_{w,mbr}^*(t)$

$$m_{w,mbr}^*(t) = M_w N \left[N_d \frac{I_{fc}(t)}{F} - A_{fc} D_w \frac{\phi_{ca}(t) - \phi_{an}(t)}{\delta_{mbr}} \right]$$

- 膜圧 δ_{mbr} , 電気浸透抗力係数 n_d , 拡散係数 D_w , アノード・カソードの相対湿度 $\phi_{ca}(t), \phi_{an}(t)$
- 絶対湿度 u と相対湿度 ϕ の関係

$$u = \frac{M_w}{M_a} \frac{\phi p_{sat}(v)}{p - \phi p_{sat}(v)}$$

2008/10/29

応用電力変換工学

41

加湿システム

- カソード出口の水分質量流量 $m_{w,ca,out}^*(t)$ は汽水分離器で放出または回収される
- 加湿器ポンプのパワー

$$P_{ahp}(t) = \frac{m_{w,inj}^*(t) \Delta p_{ahp}(t)}{\rho_w \eta_{ahp}} = \kappa_{ahp} m_{w,inj}^*(t)$$

- 加湿器ポンプによる圧力上昇

$$\Delta p_{ahp}(t) = p_{ca,in}(t) - p_{wt}$$

- 水タンク圧力 p_{wt} , ポンプ効率 η_{ahp}

2008/10/29

応用電力変換工学

42

加湿システム

- 水素供給システムに加湿器が無い場合

- アノード入口の水分質量流量

$$m_{w, an, in}^*(t) = m_{h, c}^*(t) u_{an, c} + m_{w, an, out}^*(t)$$

- 相対湿度 $u_{an, c} = 100\%$ とすることが多い。

- アノード出口の水分質量流量

$$m_{w, an, out}^*(t) = m_{w, an, in}^* - m_{w, mbr}^*(t)$$

- アノード出入口の湿度

$$u_{an, in}(t) = \frac{m_{w, an, in}^*(t)}{m_{h, in}^*(t)} \quad u_{an, out}(t) = \frac{m_{w, an, out}^*(t)}{m_{h, out}^*(t)}$$

2008/10/29

応用電力変換工学

43

加湿システム

- 加湿器は入力部の空気湿度 $u_{ca,in}(t)$ を一定に保つ

- 注入水分の質量流量 $m_{w,inj}^*(t)$ を調整

- 空気の流入質量流量に比例

- ポンプ出力はセル電流に比例

$$P_{ahp}(t) = \kappa_{ahp} I_{fc}(t)$$

2008/10/29

応用電力変換工学

44

冷却システム

- 冷却水ポンプパワー

$$P_{\text{cl}}(t) = \frac{m_{\text{cl}}^*(t)\Delta p_{\text{cl}}}{\rho_{\text{cl}}\eta_{\text{cl}}}$$

– 冷却水の質量流量は放熱の関数

$$m_{\text{cl}}^*(t) = \frac{P_{\text{l,st}}(t)}{c_{\text{p,cl}}\Delta v_{\text{cl}}}$$

• 冷却水の比熱 $c_{\text{p,cl}}$, 温度上昇 Δv_{cl}

2008/10/29

応用電力変換工学

45

冷却システム

- 冷却水で除去する熱(パワー) $P_{\text{l,st}}(t)$

– セルの発熱と同量

• 排気に含まれるエンタルピーは少ない

$$P_{\text{l,st}}(t) = [U_{\text{id}} - U_{\text{fc}}(t)]N I_{\text{fc}}(t) \quad P_{\text{cl}}(t) = \kappa_{\text{cl}} P_{\text{l,st}}(t)$$

- 冷却水の放熱ファンのパワー $P_{\text{cf}}(t)$

– 冷却水の質量流量に比例

$$P_{\text{cf}}(t) = \kappa'_{\text{cf}} m_{\text{cl}}^*(t) = \kappa'_{\text{cf}} P_{\text{l,st}}(t)$$

- 冷却システム全体のパワー

$$P_{\text{cl}}(t) + P_{\text{cf}}(t) = \kappa_{\text{cl},1} I_{\text{fc}}(t) + \kappa_{\text{cl},2} I_{\text{fc}}(t)^2$$

2008/10/29

応用電力変換工学

46

全体モデル

- 付帯設備の動作にパワー $P_{aux}(t)$ とセル電流

$$\begin{aligned}P_{aux}(t) &= P_0 + \kappa_{hp} I_{fc}(t)^2 + \kappa_{ahp} I_{fc}(t) + \kappa_{cl,1} I_{fc}(t) + \kappa_{cl,2} I_{fc}(t) \\&= P_0 + \kappa_1 I_{fc}(t) + \kappa_2 I_{fc}(t)^2\end{aligned}$$

– 線形近似 $P_{aux}(t) = P_0 + N \kappa_{aux} I_{fc}(t)$

- スタック出力はセル電流の二乗に比例

2008/10/29

応用電力変換工学

47

全体モデル

$$NR_{fc} I_{fc}(t)^2 - [NU_{oc} - N \kappa_{aux}] I_{fc}(t) + P_2(t) + P_0 = 0$$

$$I_{fc}(t) = \frac{N[U_{oc} - \kappa_{aux}] \pm \sqrt{N^2[U_{oc} - \kappa_{aux}]^2 - 4NR_{fc}[P_2(t) + P_0]}}{2NR_{fc}}$$

- 電流が分かると水素消費量も分かる

$$m_{h,c}^*(t) = N \frac{I_{fc}(t) M_h}{n_e F} = \kappa_h I_{fc}(t)$$

2008/10/29

応用電力変換工学

48