

## 风氢耦合并网系统控制策略

蔡国伟<sup>1</sup>, 陈 冲<sup>1</sup>, 孔令国<sup>1</sup>, 彭 龙<sup>1</sup>, 李振新<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司, 吉林 132010)

**摘 要:** 提出一种风氢耦合并网发电系统的控制策略。此控制策略可实现能量合理分配于混合系统的出力单元(风力机), 长期慢储单元(电解槽和燃料电池)及短暂快储单元(超级电容器)之间, 确保储氢罐压强及超级电容器荷电状态运行于安全范围之内可提高风能渗透率, 稳定直流母线电压, 并可平滑上网功率。基于PSCAD/EMTDC仿真平台, 搭建风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合并网发电系统, 4种仿真结果表明: 燃料电池及电解槽能够缓慢补偿/消纳风力机出力与负荷需求的功率差额, 超级电容器则快速平滑电解槽及燃料电池响应延迟所引起的不平衡功率, 保证混合系统出力与负荷需求实时一致。

**关键词:** 风电; 电解槽; 燃料电池; 超级电容器; 控制策略

**中图分类号:** TK513.5

**文献标识码:** A

## 0 引 言

在国家“十二五”能源发展规划中提出大力发展纯绿色能源的战略背景下, 风能高效平滑注入电网已成为国内外广大学者研究的热点。但风力发电的随机性降低了风能利用率且严重影响并网的电能品质, 因此采用风能源与储量丰厚且清洁的氢能混合发电是有效解决上述问题的手段之一。超级电容器具有功率密度高和充放电速度快等优点, 用它来平抑混合系统中电解槽与燃料电池延迟响应所引起的波动已成为不二选择<sup>[1-3]</sup>。本文所研究风力机/制氢/燃料电池/超级电容器组成的混合系统, 具有一定理论研究价值及工程实践意义。

现今国外学者针对混合系统的研究已取得一定成就, 国内学者也在同时进行探索。文献[4]提出一种光伏、风力机、燃料电池、电解槽混合系统发电的控制策略, 可保证燃料电池与电解槽协调消纳/补充光伏与风力机出力与负荷需求之间的差额。文献[5]采用永磁风力机、电解槽、燃料电池及超级电容器耦合于直流母线的结构, 解决风力机出力不可控的问题, 并提出电源跟踪与电网跟踪两种控制策略, 并证明了电源跟踪控制策略的优越性。

文献[6]采用风力机、光伏、电解槽、燃料电池及超级电容器混合系统发电的方式, 提出了满足以下两点的控制策略: 1) 网侧负荷需求实时有效供给; 2) 混合系统中各单元运行于安全可靠范围之内。文献[7]建立了光伏、电解槽、燃料电池及蓄电池的模型, 介绍了各模型特性, 提出一种控制策略, 确保在蓄电池的荷电状态处于正常运行范围之内的同时实现上网实时平滑跟踪于负荷调度曲线。文献[8]解决了电解槽与燃料电池最大最小出力的模块特性, 针对混合系统的8种运行模式, 提出一种控制策略, 可实现上网功率平滑, 确保混合系统各单元安全可靠运行。文献[9]建立风力机、超级电容器、燃料电池、电解槽、储氢罐的数学模型, 解决了电解槽与燃料电池动态响应延迟的问题, 提出的控制策略可实现混合系统出力可控。文献[10]推导电解槽、燃料电池、Buck及Boost变换器的能量传递效率, 利用电解槽及燃料电池协调配合, 消纳及补充了风力机和光伏的总出力与负荷之间的功率差额。

本文首先介绍永磁风力机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)、电解槽(electrolyzer, EL)、储氢罐(hydrogen tank, HT)、燃料电池(fuel

收稿日期: 2016-06-24

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划(SS2014AA052502); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1114); 国家自然科学基金面上项目(51377017); 吉林省科技发展计划(20180520181JH)

通信作者: 孔令国(1984—), 男, 博士、讲师, 主要从事新能源并网运行分析与优化控制方面的研究。klgwin@126.com

cell, FC)及超级电容器(supercapacitors, SC)的模型, 构建混合系统(hybrid system, HSY)结构; 然后针对混合系统运行模式提出一种控制策略, 推导各单元变流器控制信号的原理公式; 最后, 根据 PSCAD/EMTDC 的 4 种仿真结果, 验证长期存储单元与快速暂存单元的作用及控制策略有效性。

## 1 混合系统模型介绍

### 1.1 风力机与超级电容器模型

风力机风能捕获方程、 $dq$  轴电压方程、电磁转矩、转子运动方程以及 SC 能量吸收/发出方程具体详见文献[11], 本文不再赘述。

### 1.2 燃料电池模型

FC 电堆电压方程为<sup>[12]</sup>:

$$U_{fc\_stack} = N_{fc}(E_{nerst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}) \quad (1)$$

FC 耗氢摩尔流速为:

$$V_{fc\_H_2} = \frac{N_{fc}}{2F} i_{fc} \quad (2)$$

### 1.3 电解槽建模

EL 电堆电压方程为<sup>[13]</sup>:

$$U_{el\_stack} = N_{el} \left[ U_0 + \frac{r_1 + r_2 T_{el}}{A_{el}} i_{el} + (s_1 + s_2 T_{el} + s_3 T_{el}^2) \cdot \lg \left( \frac{t_1 + t_2/T_{el} + t_3/T_{el}^2}{A_{el}} + 1 \right) \right] \quad (3)$$

EL 产氢流速为:

$$V_{el\_H_2} = \eta(t_{el}, j) \frac{N_{el}}{2F} I_{el} \quad (4)$$

储氢罐的储氢量为:

$$M_{H_2} = \int_{t_1}^{t_2} (V_{el\_H_2} - V_{fc\_H_2}) dt \quad (5)$$

储氢罐压力为:

$$Pa_{H_2} = \frac{M_{H_2} RT}{V_{HT}} \quad (6)$$

## 2 混合系统协调控制

### 2.1 混合系统控制结构图

HSY 结构如图 1 所示, PMSG 单元、EL 单元、FC 单元及 SC 单元分别通过变流器、BUCK、BOOST 及双向 DC/DC 耦合于直流母线; EL 电解产生的  $H_2$  一部分用于近区/工业利用, 另一部分则通过 CM 存储于 HT 中, 以便为 FC 提供燃料, FC 燃氢的产物  $H_2O$  则通过管道为 EL 提供电解原料。

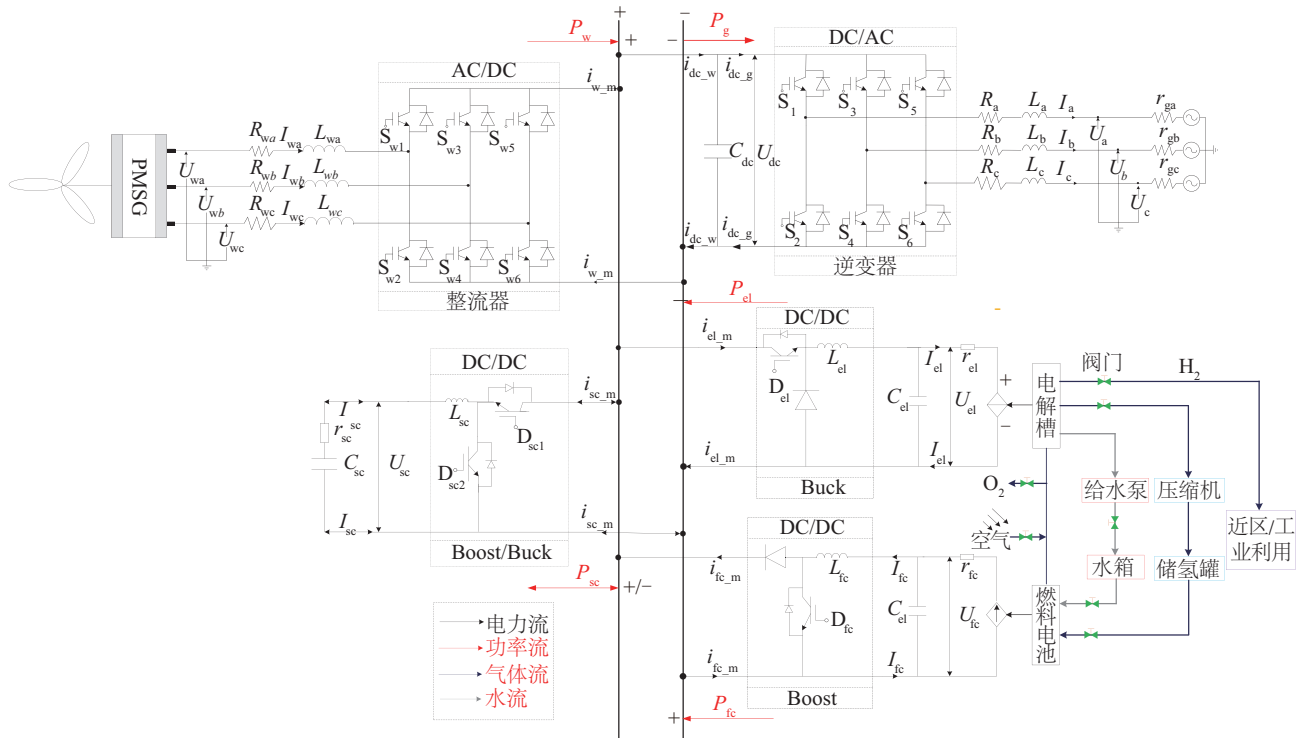


图1 混合系统结构图

Fig. 1 Architecture diagram of hybrid system

直流母线电压与 HSY 各单元电流关系为:

$$C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{dc_w} - i_{dc_g} = i_{w_m} - i_{el_m} \pm i_{sc_m} + i_{fc_m} \quad (7)$$

## 2.2 混合系统控制

### 2.2.1 机网侧控制

机网侧控制如图 2 所示。

#### 1) PMSG 单元控制

$q$  轴采用功率外环电流内环双环控制,实现了 PMSG 的最优出力,  $d$  轴采用  $I_{dref}=0$  A 的单环控制,避免永磁体消磁。具体控制如下:转子角速度  $\omega_r$  通过查表算法产生最优功率参考值  $P_{wref}$ ,实际功率  $P_w$  与其误差经过 PI 控制器的作用产生  $q$  轴电流参考值  $I_{wqref}$ 、 $I_{wqref}$  与  $I_{wq}$  比较后的误差经过 PI 环产生电压控制量,与 PMSG 空载电动势  $\omega\psi_r$  和  $d$  轴电压耦合项  $\omega L_{wd} I_{wd}$  共同作用产生  $q$  轴脉冲信号  $m_{wq}$ ;  $d$  轴

采用参考值  $I_{wdref}=0$  A 的单环控制,  $I_{wdref}$  和  $I_{wd}$  的误差经过 PI 控制器产生电压控制信号,与  $q$  轴电压耦合项  $\omega L_{wq} I_{wq}$  相互作用,产生  $d$  轴脉冲信号  $m_{wd}$ 。

#### 2) 并网单元控制

$d$  轴采用电压外环电流内环的双环控制,确保直流母线电压稳定,  $q$  采用无功功率外环电流内环双环控制,降低变流器容量、节约成本。具体如下:直流母线电压参考值  $U_{dcref}$  和直流母线电压  $U_{dc}$  的误差经过 PI 控制器后产生  $d$  轴电流参考值  $I_{dref}$ ,  $I_{dref}$  和  $I_d$  的误差经过 PI 控制器产生电压控制量,与电压前馈项  $U_d$  和  $q$  轴耦合项  $-\omega_g L_d I_q$  共同作用产生  $d$  轴的脉冲信号  $m_d$ ;无功功率参考值  $Q_{gref}$  与无功功率  $Q_g$  的误差值经过 PI 控制器产生  $q$  轴电流参考值  $I_{qref}$ ,  $I_{qref}$  与  $I_q$  的误差经过 PI 控制器产生电压控制量,与  $d$  轴耦合项  $\omega_g L_q I_d$  共同作用产生  $q$  轴脉冲信号  $m_q$ 。

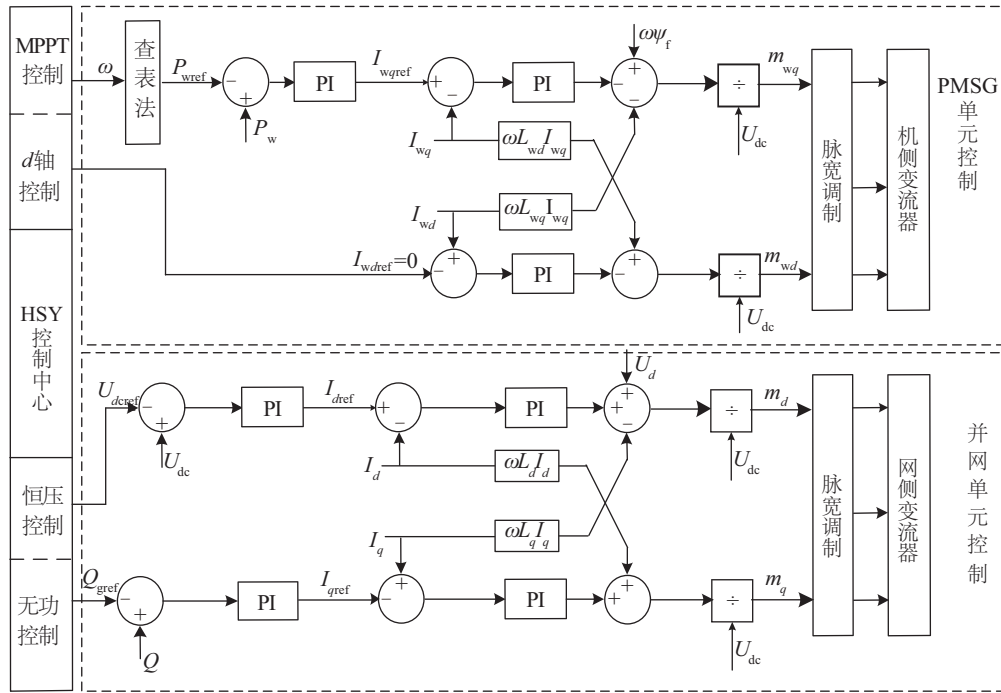


图2 机网侧控制原理

Fig. 2 Control diagram of side of machine and grid

### 2.2.2 储能单元控制

储能单元控制如图 3 所示。

#### 1) 短暂快储单元控制

短暂快储单元采用恒功率控制,通过快速充放电,消纳/补偿 EL 与 FC 响应延迟所引起的功率不平衡量。具体控制如下:HSY 能量管理中心产生 SC 参考功率  $P_{scref}$ ,与 SC 端电压  $U_{dsc}$  相除,产生电流参考值  $I_{scref}$ 、 $I_{scref}$

与  $I_{sc}$  的误差经过 PI 控制器产生控制信号  $D_{sc}$ 。

#### 2) 长期慢储单元控制

长期慢储单元采用恒功率控制,由 EL 与 FC 缓慢消纳/补偿风力机出力与负荷之间的功率差额。具体控制如下:HSY 控制中心产生 EL 应该消纳功率值  $P_{el1}$ 、 $P_{el1}$  经过延迟模块 ( $G_{el}$  与  $T_{el}$  分别为延迟模块比例系数和积分系数)产生参考功率  $P_{elref}$ 、与

EL 端电压  $U_{el}$  相除产生电流参考值  $I_{elref}$ 、 $I_{elref}$  与  $I_{el}$  的误差经过 PI 控制器产生控制信号  $D_{el}$ 。

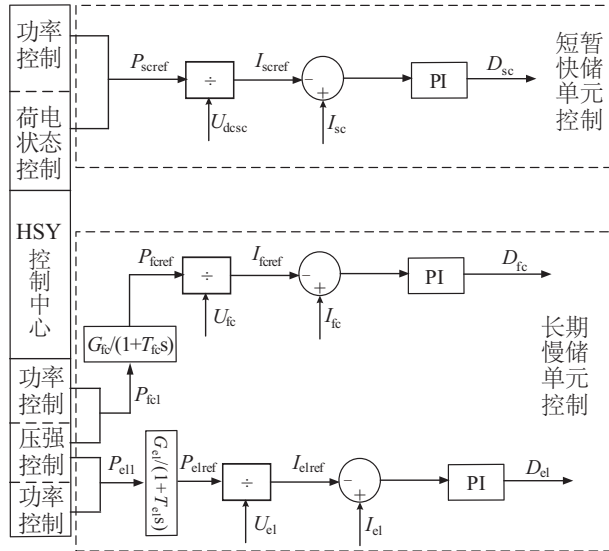


图3 储能单元控制原理

Fig. 3 Control diagram of storage unit

HSY 能量管理中心产生 FC 应该输出功率  $P_{fc1}$ 、 $P_{fc1}$  经过延迟模块 ( $G_{fc}$  与  $T_{fc}$  分别为延迟模块比例系数和积分系数) 产生参考功率  $P_{fcsc}$ ，与 FC 端电压  $U_{fc}$  相除产生电流参考值  $I_{fcsc}$ 、 $I_{fcsc}$  与  $I_{fc}$  的误差经过 PI 控制器产生控制信号  $D_{fc}$ 。

### 2.3 混合系统控制模式

为提高 HSY 能量利用效率, EL 与 FC 不同时运行。HSY 的能量管理如图 4 所示。

HSY 运行状态可具体表示为模式 1~模式 8。

模式 1: 当系统满足式(8):

$$\begin{cases} Pa_{H_2} < Pa_{H_2\_max} \\ SOC < SOC_{m\_max} \end{cases} \quad (8)$$

EL 消纳系功率为  $P_{el}$ , SC 快速动作, 吸收/补偿 EL 由于延迟所引起的功率不平衡量, 吸收/补偿功率可表示为:

$$P_{sc\_ref} = P_w - P_g - P_{el} \quad (9)$$

模式 2: 当系统满足式(10):

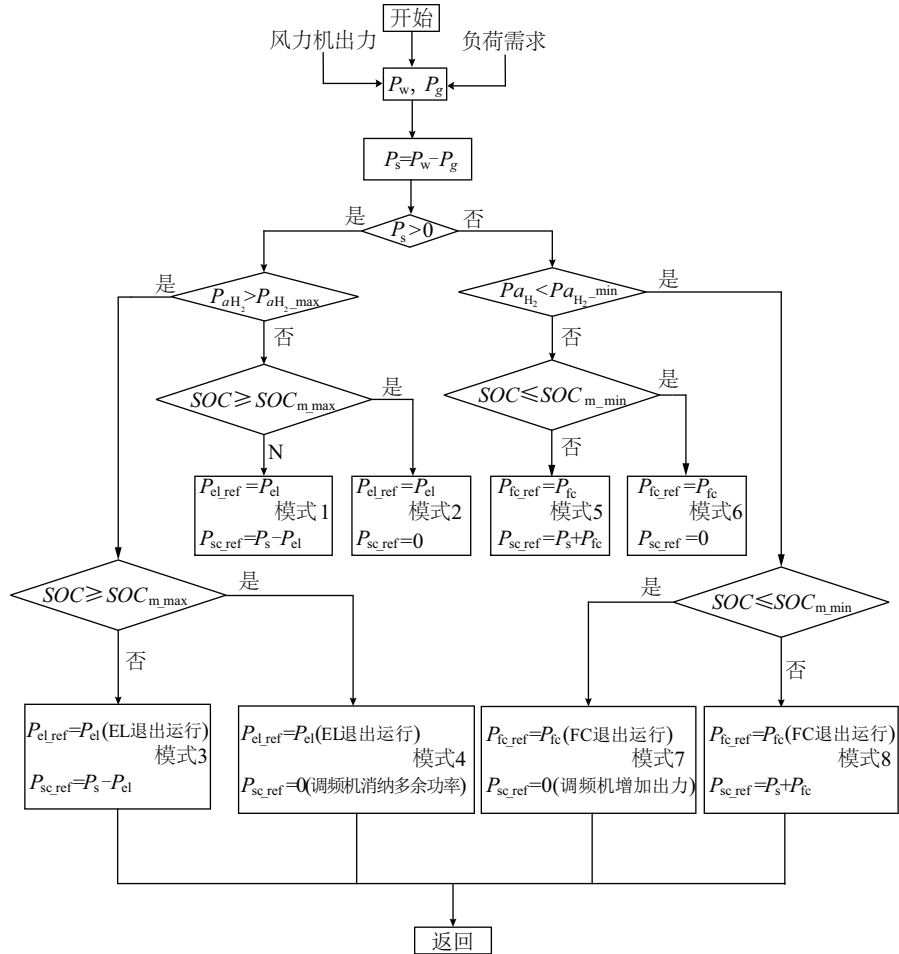


图4 HSY 流程图

Fig. 4 Flow diagram of HSY

$$\begin{cases} Pa_{H_2} < Pa_{H_2\_max} \\ SOC \geq SOC_{m\_max} \end{cases} \quad (10)$$

EL 消纳系统功率为  $P_{el}$ , SC 的 SOC 由于达到上限,退出运行。

模式 3:当系统满足式(11):

$$\begin{cases} Pa_{H_2} \geq Pa_{H_2\_max} \\ SOC < SOC_{m\_max} \end{cases} \quad (11)$$

EL 缓慢退出运行,即 EL 消纳系统功率由  $P_{el}$  缓慢降为 0 W,此时 SC 吸收/补偿系统功率为:

$$P_{sc\_ref} = P_w - P_g - P_{el} \quad (12)$$

模式 4:当系统满足式(13):

$$\begin{cases} Pa_{H_2} \geq Pa_{H_2\_max} \\ SOC \geq SOC_{m\_max} \end{cases} \quad (13)$$

EL 缓慢退出运行,即 EL 消纳系统功率由  $P_{el}$  缓慢降为 0 W,由于 SC 的 SOC 达到了上限,即刻退出运行,HSY 中调频机组消纳系统剩余功率。

模式 5:当系统满足式(14):

$$\begin{cases} Pa_{H_2} > Pa_{H_2\_min} \\ SOC > SOC_{m\_min} \end{cases} \quad (14)$$

FC 注入系统功率为  $P_{fc}$ , SC 快速动作,吸收/补

偿 EL 由于延迟所引起的功率不平衡量,吸收/补偿功率可表示为:

$$P_{sc\_ref} = P_w - P_g + P_{fc} \quad (15)$$

模式 6:当系统满足式(16):

$$\begin{cases} Pa_{H_2} > Pa_{H_2\_min} \\ SOC \leq SOC_{m\_min} \end{cases} \quad (16)$$

FC 注入系统功率为  $P_{fc}$ , SC 的 SOC 由于达到下限,退出运行。

模式 7:当系统满足式(17):

$$\begin{cases} Pa_{H_2} \leq Pa_{H_2\_min} \\ SOC \leq SOC_{m\_min} \end{cases} \quad (17)$$

FC 缓慢退出运行,即 FC 注入系统功率由  $P_{fc}$  缓慢降为 0 W,由于 SC 的 SOC 达到了下限,即刻退出运行,HSY 中调频机组增加出力。

模式 8:当系统满足式(18):

$$\begin{cases} Pa_{H_2} \leq Pa_{H_2\_min} \\ SOC > SOC_{m\_min} \end{cases} \quad (18)$$

FC 缓慢退出运行,即 FC 注入系统功率由  $P_{fc}$  缓慢降为 0 W,此时 SC 吸收/补偿系统功率为:

$$P_{sc\_ref} = P_w - P_g + P_{fc} \quad (19)$$

上述 HSY 中 8 种模式的选择情况如图 5 所示。

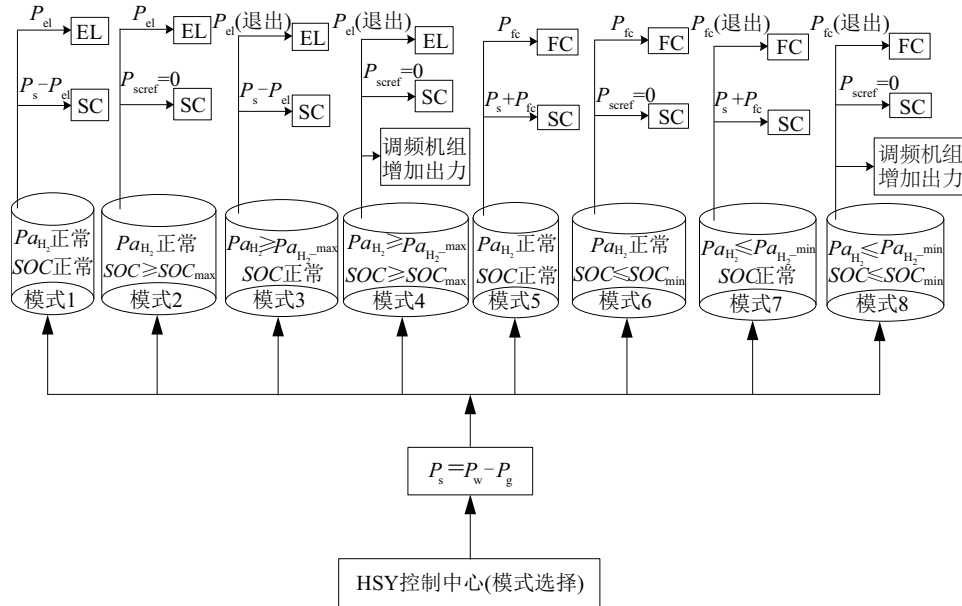


图 5 HSY 模式选择

Fig. 5 Mode selection of HSY

### 3 算例分析

本文在电力仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建

了风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合并网系统,并进行 4 次仿真验证。HSY 各个单元主要参数见表 1。



表1 HSY主要参数

Table 1 The main parameters of HSY

HSY 参数	值
PMSG 额定容量 $P_{\text{wN}}/\text{kW}$	50
EL 额定容量 $P_{\text{elN}}/\text{kW}$	40
FC 额定容量 $P_{\text{fcN}}/\text{kW}$	40
SC 额定容量 $C_{\text{N}}/\text{F}$	15
SC 荷电状态上限值 $SOC_{\text{max}}/\%$	70
SC 荷电状态下限值 $SOC_{\text{min}}/\%$	50
TK 压强最大值 $P_{a_{\text{H2\_max}}}/\text{Pa}$	6000
TK 压强最小值 $P_{a_{\text{H2\_min}}}/\text{Pa}$	1000
EL 延迟模块增益常数 $G_{\text{el}}$	1
EL 延迟模块时间常数 $T_{\text{el}}$	0.3
FC 延迟模块增益常数 $G_{\text{fc}}$	1.1
FC 延迟模块时间常数 $T_{\text{fc}}$	0.2

1) 仿真 1: 风力机单独并网

由于 PSCAD/EMTDC 是电磁暂态仿真软件, 仿真时间较短, 因此本文以秒级时间尺度代表 HSY 运行尺度。风力机单独并网时, 电网调度曲线及上网功率曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 风力机单独并网时, 最终上网功率波动较大, 不能满足电网负荷调度曲线要求, 会引起电网频率不稳定, 电能品质较差。

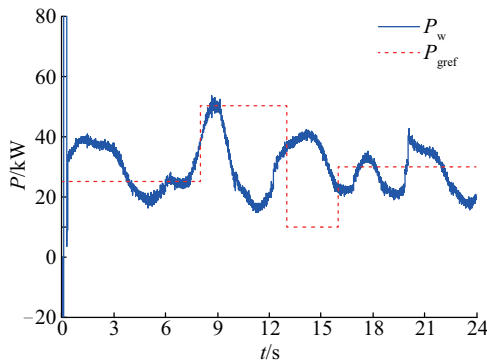


图6 负荷调度曲线及上网功率情况

Fig. 6 Curve of output of load dispatch and power into grid

风力机风速及最大功率跟踪情况如图 7 所示。由图 7 可知, 风速曲线与风力机输出功率曲线波动情况实时一致, 且风力机输出功率实时稳定无误差地跟踪最优输出功率; 当风速超过额定风速 9 m/s 时, 为保证风力机安全可靠地运行, 风力机桨距角的加大, 使风力机输出功率稳定于额定功率

50 kW;  $dq$  轴电流在 PI 控制器的作用下, 快速稳定无误差地跟踪参考值。

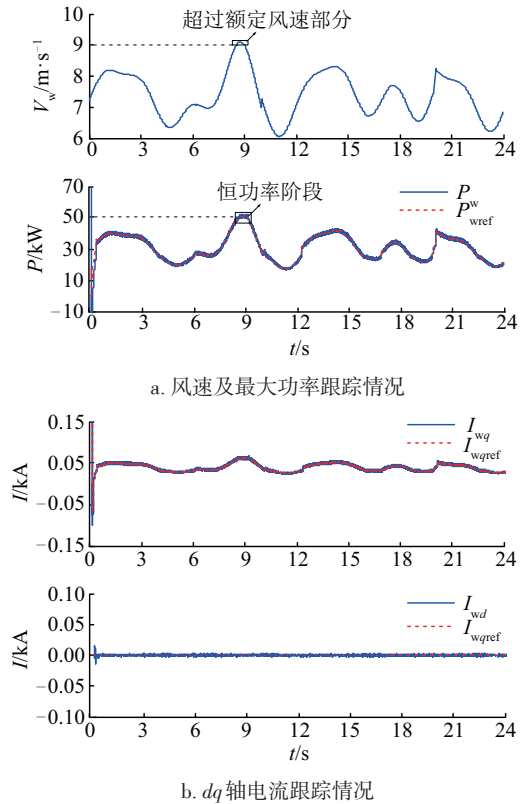


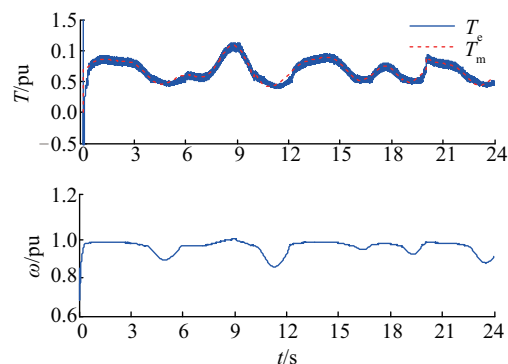
图7 风速、功率及电流跟踪情况

Fig. 7 Curve of wind, tracking of power and current

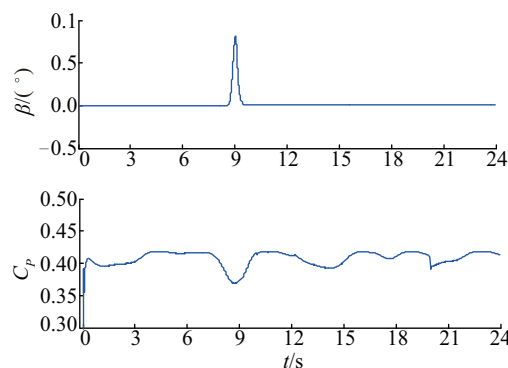
基于上述风力机风速及最优功率输出情况, 风力机的电磁转矩、机械转矩、桨距角及风能捕获系数输出情况如图 8 所示。由图 8 可知, 电磁转转矩实时跟踪着机械转矩, 电气角速度运行于 0.85~1.00 之间, 当风速小于额定风速时, 桨距角为  $0^\circ$ , 当风速超过额定风速时, 桨距角增大, 此时风能利用系数降低。

2) 仿真 2: PMSG、EL 和 FC 混合并网

基于风力机单独并网时相同的风速条件及负荷调度曲线, PMSG、EL 和 FC 混合并网的电网调度曲线、上网功率、风力机出力、EL 消纳功率、FC 出力及 HT 压力情况如图 9 所示。由图 9 可知, 最终上网功率相比风力机单独并网时, 波动减小, 但仍不能保证与调度曲线实时一致。当电网负荷需求小于风力机出力时, EL 消纳多余功率, 在 3.55、15.19 和 21.47 s 时, 储氢罐压力达到上限 6 kPa, EL 退出运行; 当电网负荷需求大于风力机出力时, FC 补充系统功率缺额, 在 11.77 s 时达到储氢罐压力下限 1 kPa, FC 退出运行。



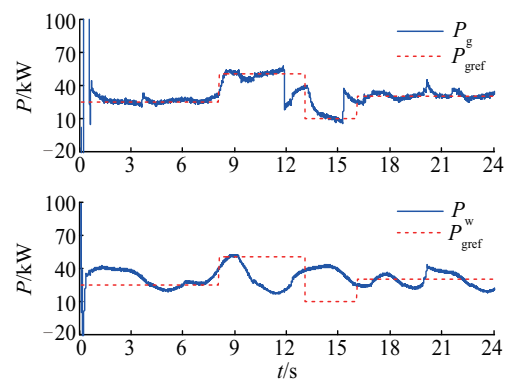
a. 转矩输出情况



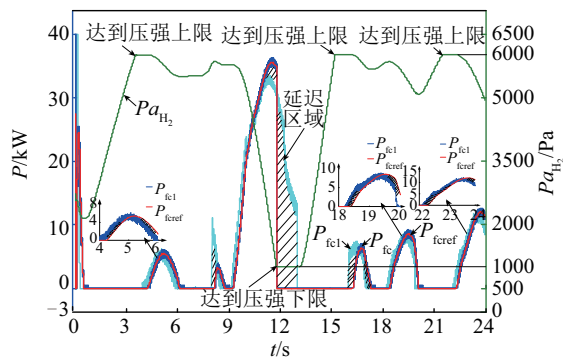
b. 桨距角及风能利用系数

图8 风力机参数

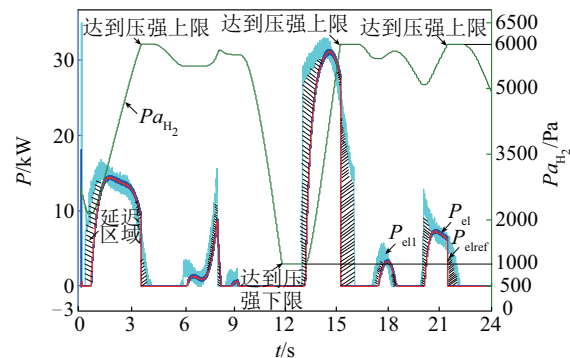
Fig. 8 Curve of parameters of wind turbine



a. 上网功率、负荷调度曲线及风力机出力



b. FC功率跟踪及HT压强

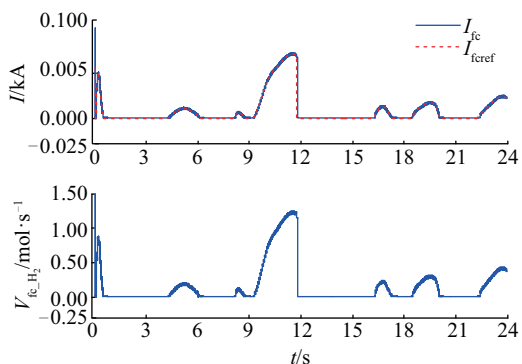


c. EL功率跟踪及HT压强

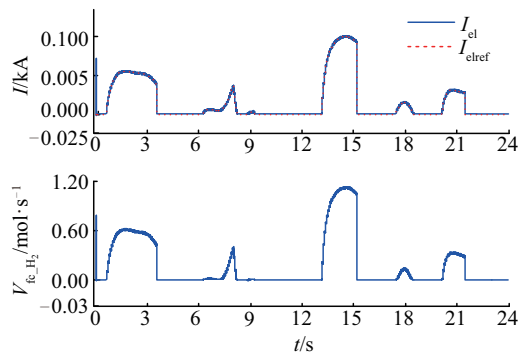
图9 HSY功率及压强情况

Fig. 9 Curve of power and pressure of HSY

EL 与 FC 的电流跟踪情况及产耗氢流速情况如图 10 所示。由图 10 可知,EL 与 FC 电感电流在 PI 控制器的作用下实时稳定无误差地跟踪参考值,且 EL 的产氢流速和 FC 的耗氢流速与各自电流波动情况一致。



a. FC电流跟踪及耗氢流速



b. EL电流跟踪及产氢流速

图10 电流跟踪及氢流速情况

Fig. 10 The curve of current tracking and hydrogen flow rate

### 3) 仿真 3: PMSG、EL、FC 及 SC 混合并网

基于风力机单独并网时相同的风速条件及负荷调度曲线, PMSG、EL、FC 及 SC 混合并网系统的

电网调度曲线、上网功率、SC 吸收/发出由 EL 与 FC 响应延迟所引起的剩余功率/短缺功率及其  $SOC$  的情况如图 11 所示。由图 11 可知,最终上网功率实时稳定无误差地跟踪电网负荷调度曲线,SC 通过充放电,平衡因 EL 与 FC 响应延迟及储氢罐压力达到上下限 EL 与 FC 退出运行所引起的剩余/短缺功率,其  $SOC$  运行于 56.5%~60%之间,波动范围较小;SC 电感电流波动情况与其功率波动情况一致,且在 PI 控制器的作用下实时稳定无误差地跟踪电流参考值。

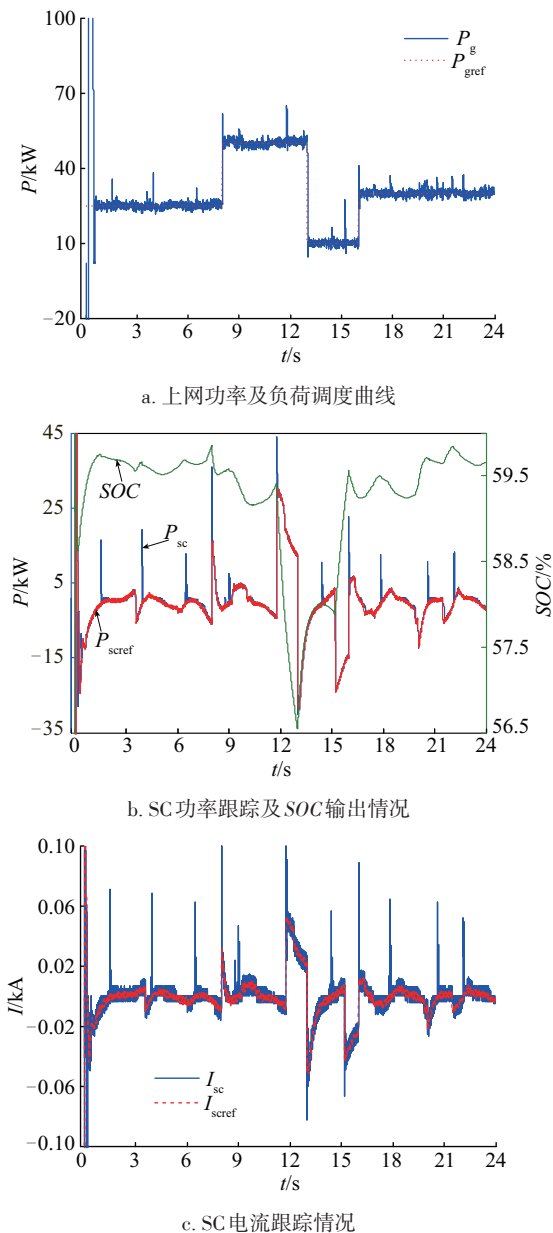


图 11 HSY 功率、电流及  $SOC$  波动情况

Fig. 11 The curve of power, current and  $SOC$  of HSY

直流母线电压、注入电网的无功功率及网侧  $dq$  轴电流输出情况如图 12 所示。由图 12 可知,直流母线电压、无功功率、 $dq$  轴电流在各自 PI 控制器的作用下均能快速稳定无误差地跟踪各自的参考值,且直流母线电压始终稳定于 1 kV,注入电网的无功功率为 0 kvar,  $q$  轴电流始终稳定于 0 kA,  $d$  轴电流波动情况与注入电网有功功率波动情况一致。

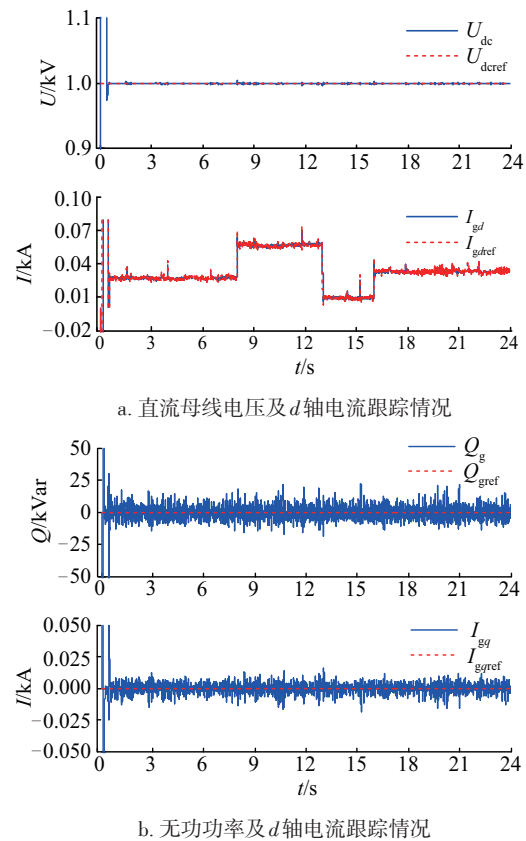


图 12 电压、功率及电流跟踪情况

Fig. 12 The curve of voltage, power and current tracking

#### 4) 仿真 4: PMSG 与 SC 混合并网

基于风力机单独并网时相同的风速条件及负荷调度曲线, PMSG 与 SC 混合并网的上网功率、负荷调度曲线、SC 吸收/发出有功功率、SC 的  $SOC$  及 SC 电感电流输出情况如图 13 所示。由图 13 可知, PMSG 与 SC 并网时, SC 吸收/发出功率较大,即  $SOC$  变化范围大,极易达到其上下限,这导致上网功率在此时出现波动; SC 功率与电流在 PI 控制器的作用下,实时稳定无误差地跟踪参考值,且波动趋势一致。



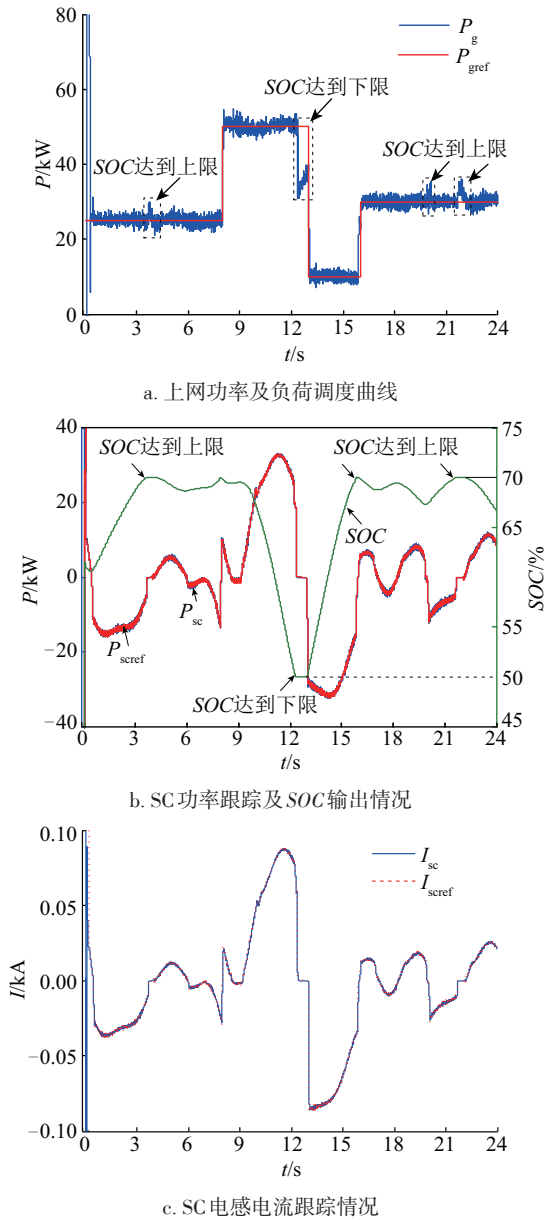


图 13 HSY 功率、SOC 及电流跟踪情况

Fig. 13 The curve of power, SOC and current tracking

## 4 结 论

本文构造 PMSG、EL、FC 及 SC 耦合于直流母线的结构,并提出契合 HSY 的能量管理策略,通过 PSCAD/EMTDC 中 4 种仿真结果验证 HSY 控制策略的有效性,并通过 4 种仿真结果的对比,得出以下主要结论:

- 1) 采用 PMSG、EL、FC 及 SC 混合并网,可确保上网功率实时平滑,且 SC 的 SOC 变化范围较小;
- 2) EL 和 FC 由于响应延迟,使其能缓慢消纳/补

充风力机出力与负荷之间的功率差额,减缓风力机单独并网时上网功率的波动;

3) SC 通过快速充放电,平抑了 EL 与 FC 响应延迟所引起的功率波动,保证了上网功率实时稳定误差跟踪负荷调度曲线,提高了风能利用率。

### 符号表

$U_{fc\_stack}$	FC 电堆电压, V
$E_{nerst}$	热力学电动势, V
$V_{act}$	活化过电压, V
$V_{ohm}$	欧姆过电压, V
$V_{conc}$	浓差过电压, V
$N_{fc}$	FC 单体串联数量
$V_{fc\_H_2}$	耗氢摩尔流量, mol/s
$F$	法拉第常数, C/mol
$U_{el\_stack}$	EL 电堆电压, V
$i_{el}$	EL 电流, A
$U_0$	随着温度和压力缓慢变化的可逆电池电压, V
$s_1$	电极过电压参数, V
$s_2$	电极过电压参数, $V \cdot ^\circ C^{-1}$
$s_3$	电极过电压参数, $V \cdot ^\circ C^{-2}$
$t_1$	电极过电压参数, $m^2 \cdot A^{-1}$
$t_2$	电极过电压参数, $m^2 \cdot A^{-1} \cdot ^\circ C$
$t_3$	电极过电压参数, $m^2 \cdot A^{-1} \cdot ^\circ C$
$A_{el}$	电极面积, $m^2$
$t_{el}$	EL 电解液温度, $^\circ C$
$j$	电流密度, $\Omega \cdot m^2$
$r_2$	电解液欧姆电阻参数, $\Omega \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$
$T_{el}$	电解液温度, $^\circ C$
$N_{el}$	EL 电池串联数量
$V_{el\_H_2}$	产氢速率, mol/s
$H$	函数
$R_{wa}$	PMSG 单元电阻, $\Omega$
$R_{wb}$	PMSG 单元电阻, $\Omega$
$R_{wc}$	PMSG 单元电阻, $\Omega$
$L_{wa}$	PMSG 单元电感, H
$L_{wb}$	PMSG 单元电感, H
$L_{wc}$	PMSG 单元电感, H
$U_{wa}$	PMSG 单元电压, V
$U_{wb}$	PMSG 单元电压, V
$U_{wc}$	PMSG 单元电压, V
$I_{wa}$	PMSG 单元电流, A
$I_{wb}$	PMSG 单元电流, A
$I_{wc}$	PMSG 单元电流, A

$R_a$	并网单元电阻, $\Omega$
$R_b$	并网单元电阻, $\Omega$
$R_c$	并网单元电阻, $\Omega$
$L_a$	并网单元电感, H
$L_b$	并网单元电感, H
$L_c$	并网单元电感, H
$U_a$	并网单元电压, V
$U_b$	并网单元电压, V
$U_c$	并网单元电压, V
$I_a$	并网单元电流, A
$I_b$	并网单元电流, A
$I_c$	并网单元电流, A
$r_{ga}$	发电机电阻, $\Omega$
$r_{gb}$	发电机电阻, $\Omega$
$r_{gc}$	发电机电阻, $\Omega$
$U_{sc}$	SC 端电压, V
$I_{sc}$	SC 端电流, A
$r_{sc}$	SC 电阻, $\Omega$
$C_{sc}$	SC 等效电容, F
$U_{fc}$	FC 端电压, V
$I_{fc}$	FC 端电流, A
$r_{fc}$	FC 电阻, $\Omega$
$C_{fc}$	FC 等效电容, F
$U_{el}$	EL 端电压, V
$I_{el}$	EL 端电流, A
$r_{el}$	EL 电阻, $\Omega$
$C_{el}$	EL 等效电容, F
$S_{w1} \sim S_{w6}$	PMSG 单元变流器电控制信号
$S_1 \sim S_6$	并网单元变流器电控制信号
$D_{sc1} \sim D_{sc2}$	SC 单元变流器电控制信号
$D_{el}$	EL 单元变流器电控制信号
$D_{fc}$	FC 单元变流器电控制信号
$P_w$	PMSG 单元发出功率, kW
$P_{sc}$	SC 单元发出/吸收功率, kW
$P_{el}$	EL 单元消纳功率, kW
$P_{fc}$	FC 单元发出功率, kW
$P_g$	并网单元上网功率, kW
$C_{dc}$	直流母线电容, F
$U_{dc}$	直流母线电压, V
$i_{dc_w}$	直流母线流入电流, A
$i_{dc_g}$	直流母线流出电流, A
$i_{w_m}$	PMSG 单元流出电流, A
$i_{sc_m}$	EL 单元流出/流入电流, A
$i_{fc_m}$	FC 单元流出电流, A

## [参考文献]

- [1] Liu Chunhua, Chau K T. An efficient wind-photovoltaic hybrid generation system using doubly excited permanent-magnet brushless machine[J]. Industrial Electronics, 2010, 57(3): 831—838.
- [2] Thale S S., Wandhare R G. A novel reconfigurable microgrid architecture with renewable energy sources and storage[J]. Industry Applications, 2015, 51(2): 1805—1815.
- [3] 蒋 玮, 周 赣. 一种适用于微电网混合储能系统的功率分配策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 38—43.
- [3] Jiang Wei, Zhou Gan. A novel operation and control strategy for a standalone hybrid renewable power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 38—43.
- [4] Wang Caisheng, Nehrir M H. Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system[J]. Energy Conversion, 2008, 23(3): 957—966.
- [5] Zhou Tao, Francois B. Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration[J]. Industrial Electronics, 2011, 58(1): 95—103.
- [6] Patsios C, Antonakopoulos M, A Chaniotis, et al. Control and analysis of a hybrid renewable energy-based power system[J]. Electrical Machines, 2010, 32(25): 105—111.
- [7] Djoudi H, Badji A. Modeling and power management control of the photovoltaic and fuel cell/electrolyzer system for stand-alone applications[A]. 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM) [C], Rome, Italy, 2015: 1—6.
- [8] Haruni A M O, Negnevitsky M, Haque M E, et al. A novel operation and control strategy for a standalone hybrid renewable power system[J]. Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 402—412.
- [9] Abdelkafi A, Krichen L. Energy management optimization of a hybrid power production unit based renewable energies[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2014, 62(25): 1—9.
- [10] Agbossou K, Kolhe M, Hamelin J, et al. Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 633—640.
- [11] 蔡国伟, 陈 冲, 孔令国. 风电/光伏/制氢/超级电容

- 器并网系统建模与控制[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 5—9.
- [11] Cai Guowei, Chen Chong, Kong Lingguo. Modeling and control of grid-connected system of wind/PV/electrolyzer and SC[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 5—9.
- [12] Maruf-ul-Karim M, Iqbal M T. Dynamic modeling and simulation of alkaline type electrolyzers[A]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'09) [C], St. John's, NL, Canada, 2009: 711—715.
- [13] Valverdeisorna L, Ali D, Hogg D. Modelling the performance of wind-hydrogen energy systems: Case study the hydrogen office in Scotland/UK [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53(11): 1313—1331.

## CONTROL STRATEGY OF HYBRID GRID-CONNECTED SYSTEM OF WIND AND HYDROGEN

Cai Guowei<sup>1</sup>, Chen Chong<sup>1</sup>, Kong Lingguo<sup>1</sup>, Peng Long<sup>1</sup>, Li Zhenxin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Jilin Power Supply Company of Jilin Electric Power Corporation Ltd., State Grid, Jilin 132010, China)

**Abstract:** A control strategy of wind and hydrogen hybrid grid-connected power generation system is presented. The control strategy can realize that the energy is distributed reasonably into power unit (wind turbine), long-term slow storage unit (electrolyzer and fuel cell) and short-term fast storage unit (supercapacitors) of hybrid system, and also ensure that the pressure of hydrogen tank and state of charge of super capacitors run within safe range to improve the penetration rate of wind energy, stabilize the DC bus voltage and smooth the grid-connected power. The hybrid grid-connected power generation system of wind power/hydrogen production/fuel cell/super capacitor is built up based on the PSCAD/EMTDC simulation platform. And four simulation results show that the fuel cell and electrolyzer can compensate/consume slowly the power difference between the power generated by wind turbines and the power required by load, super capacitor can quickly smooth unbalance power caused by response delay of electrolyzer and fuel cell, and ensure the power output of hybrid system is consistent with load demand all the time.

**Keywords:** wind; electrolyzer; fuel cell; supercapacitors; control strategy