

风氢互补发电系统构建初探

徐 晔, 陈晓宁

(解放军理工大学, 南京 210007)

[摘要] 为了解决风力发电输出功率的不平稳性和电压的波动性,以解决并网的瓶颈问题,提出风氢互补发电系统,将风力发电输出“波谷”对应的可控出力作为风电场能保证恒定输出的功率,“波峰”至“波谷”之间对应的不可控的出力,采用“波峰”制氢进行“削峰”、“波谷”氢气发电进行“填谷”的方式进行平衡。并以如东风电场为例进行了实例分析与计算,结果证明采用该风氢互补系统基本能保证发电输出平衡,是解决风电并网有效可行的途径。

[关键词] 风力发电;氢能发电;制氢储氢

[中图分类号] TK91;TK89 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)11-0083-06

1 前言

发展风力发电是我国解决能源危机的重要战略方针,将风力发电与常规电网联网是大规模利用风电最经济的方式,但风电场与电力系统并网还存在若干技术难关,增强电网接纳风电的能力,对发展超大型风电场解决技术瓶颈问题具有重要意义。

超大风力发电场与电力系统并网的关键问题就是解决风电场功率输出不平稳及电压波动问题。这一问题也是风电场接入电力系统的技术瓶颈问题。风是自然现象,完全是随机的,风电场的出力具有间断性和不可控性,然而电力系统每时每刻都必须保持发电量与用电量的平衡,十分强调可控性,一旦风电并网,其出力的不可预测性必然对电力系统造成不良影响,如果风电场的容量大到一定程度,甚至会危及整个系统安全。

改善风电场出力的不可控性,平稳风电场的功率输出是提高电网接纳风电容量的主要途径。局部风电场的发电机出力是完全不可控的,但超大风电场的发电机总出力将呈现某种统计规律,是具有“波峰”、“波谷”上下波动的曲线。文章提出并构建了风氢互补发电系统的方案,即将“波谷”对应的可控出力作为风电场能保证恒定输出的功率,“波峰”

至“波谷”之间对应的不可控的出力,采用“波峰”制氢进行“削峰”、“波谷”氢气发电进行“填谷”的方式进行平衡。并以如东风电场为例进行了实例分析与计算。

2 风氢互补发电系统的组成与工作原理

2.1 系统总体方案与组成

风氢互补系统由装有大量风力发电机的大型风电场、制氢站、储氢设备、氢能发电站组成,如图1所示。

风力发电是将机械能转换为电能。自然界的风速是随机变化的,风力机所产生的电能时大时小,风电场的出力极不稳定。当风电场的出力较大时,可以消耗电能制氢,通过制氢站的设备(制氢单元)将电能转换为氢气储存在储氢设备(储氢单元)中,当风速很小或无风的时候,再将存储起来的氢气供给氢能发电站,将氢气的化学能再转换为电能,调节和补偿由于风速的波动而引起风电场出力的波动,起到削峰填谷的作用,使整个发电系统能够输出平稳,消除因大规模开发风能而对电网产生的不良影响。

[收稿日期] 2010-07-28

[作者简介] 徐 晔(1964—),女,江西南昌市人,解放军理工大学副教授,研究方向为军用新电源技术;E-mail:xuye0414@126.com

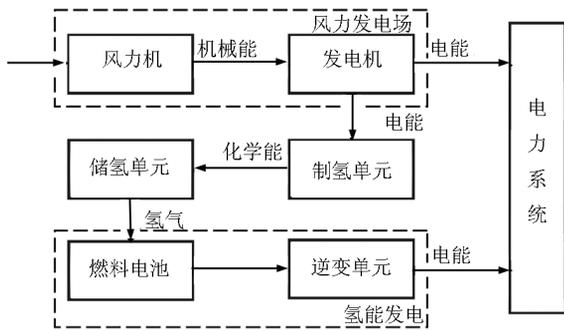


图1 风氢互补发电系统的组成示意图

Fig.1 Composition diagram of the wind and hydrogen power electric generating system

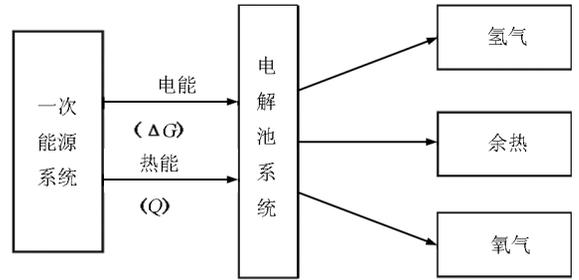


图2 电解水制氢系统组成示意图

Fig.2 Composition diagram of the system of hydrogen generated by electrolyzing waters

源的能量含量之比。则电解制氢系统总制氢效率模型建立如下。

电解水制氢过程中,所需的总能量 Q_t (一次能源系统提供)为:

$$Q_t = Q_{th} + Q_{el} \quad (2)$$

式(2)中, Q_{th} 为电解池所需的热能; Q_{el} 为产生电解池所需电能消耗的热能。可得, 电解水制氢系统的总制氢效率为:

$$\eta_t = \frac{\Delta H_H}{Q_{th} + Q_{el}} \quad (3)$$

式(3)中, ΔH_H 为氢的焓值。

SOEC 电解池在电解过程中所消耗的能量由电能和高温热能两部分组成, 其总制氢效率^[1] 为

$$\eta_t = \frac{\Delta H_H}{\frac{\Delta G(T)}{\eta_{el} \eta_{th}} + \frac{Q_{th}(T)}{\eta_{th}} \cdot \frac{\Delta G(T)}{\eta_{el} \eta_{th}} (1 - \eta_{el})} \quad (4)$$

式(4)中, η_{th} 为 SOEC 电解制氢系统热效率, 包括一次能源系统与电解池系统之间系统的热损失、电解池系统自身的热损失及电解池系统热循环利用效率等。

SOEC 电解池的工作温度较高, 水蒸气分解所需的总能量 ΔH 由电能 ΔG 和高温热能 Q 构成。电解所需电能 ΔG 随着温度的升高而降低, 温度由 100°C 升至 1000°C 时, 电能 ΔG 占电解过程所需的总能量 (ΔH) 比重由 93% 降至约 70% , 从而提高了系统总制氢效率。另外, 高温条件下电解, 使电解池的极化、传质等能量损失显著降低, 可使 SOEC 电解效率高达 90% 以上。

由于 SOEC 工作温度为 $800 \sim 950^\circ\text{C}$, 所以一次能源系统一般采用可同时提供电能和高温热能的高温气冷反应堆 (HTGR)。HTGR 出口温度约为 $750 \sim 950^\circ\text{C}$, 若采用先进的氦气透平发电技术, 其发电效率可高达 $42\% \sim 47\%$ 。将高温气冷堆作为

2.2 制氢与储氢系统

2.2.1 制氢方式的选择

当今工业上大规模制氢方法主要有甲烷蒸汽重整 (SMR) 和电解水制氢。甲烷蒸汽重整是目前最经济的大规模制氢方法, 但其消耗大量化石燃料, 产生大量二氧化碳。

电解水制氢方法主要有 3 种: 常规碱性、固体聚合物电解 (SPE) 及固体氧化物电解池 (SOEC) 电解制氢。常规碱性电解水制氢技术成本较高, 总制氢效率较低, 发电过程也是消耗化石燃料, 排放二氧化碳。

固体氧化物电解水制氢系统制氢效率约是碱性电解制氢系统总制氢效率 (约 25%) 的 2 倍多, SPE 电解制氢系统 (约 35%) 的 1.5 倍, 是目前已知最高效率的制氢系统, 最有希望满足未来风电场大规模、可持续、清洁、高效的制氢要求。

2.2.2 SOEC 电解水制氢系统效率

电解水制氢过程实际上是一种能量转换过程, 即将一次能源转换为能源载体氢能的过程。因此电解水制氢系统组成主要由一次能源系统和电解池系统组成, 如图 2 所示。

一次能源系统输出电能 (ΔG) 和高温热能 (Q) 至 SOEC 电解池系统, 在电能和高温热能的共同作用下, 将水蒸气电解生成氢气和氧气。

电解水制氢所需的总能量 (ΔH) 来源由电能 (ΔG) 和热能 (Q) 构成, 即:

$$\Delta H(T) = \Delta G(T) + Q(T) \quad (1)$$

由于电解制氢过程本质上是 将一次能源转化为二次能源 (能源载体) 的过程, 因此电解水制氢系统效率定义为: 在电解制氢过程中, 制备所得二次能源 (氢气) 的能量含量与制氢过程所消耗的一次能

SOEC 电解水制氢系统的一次能源,并假定SOEC电解水制氢系统的电解效率和热效率均为 90%,则由电解制氢系统总制氢效率式(4)可计算得出实际SOEC 电解水制氢系统的总制氢效率。

2.3 氢能发电系统

2.3.1 氢能发电方式的选择

氢能发电的主体是燃料电池,其工作原理相当于水电解的“逆”过程,其结构主要由 4 部分组成:阳极、阴极、电解质和外部电路,如图 3 所示。阳极为氢燃料发生氧化的场所,阴极为氧化剂还原的场所。通常,阳极和阴极上都含有一定量的催化剂,以加速电极上发生的电化学反应。其反应过程如下:

1) 氢气通过管道或导气板到达阳极。

2) 在阳极催化剂作用下,一个氢分子分解为两个氢原子,并释放出两个电子。阳极反应为:

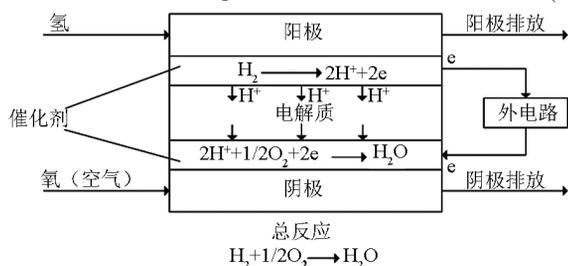


图 3 PEMFC 工作原理示意图

Fig. 3 Working principle diagram of PEMFC

3) 氢质子穿过质子交换膜到达阴极,电子通过外电路也到达阴极(质子交换膜只能传导质子),在阴极催化剂的作用下,氧分子与氢质子和电子还原生成水。阴极反应为:



总的化学反应如下:



当电子通过外电路流向阴极时就产生了直流电,只要保证物质供应的连续性,就可以保证能量输出的连续性。燃料电池种类繁多,按照电解质类型分为:碱性燃料电池(AFC)、磷酸燃料电池(PAFC)、质子交换膜燃料电池(PEMFC,也称固体高聚合物电解质燃料电池)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)等。

2.3.2 氢能发电站的组成

PEMFC 发电站由 PEMFC 发电机和氢气储存装置、空气供应保障系统、氢气安全监控与排放装置、

冷却水库和余热处理系统、电气系统及电站自动化系统构成,如图 4 所示。

氢气存储装置为发电机提供氢气,其储量按负荷所需发电量确定。氢气安全监控与排放装置是氢能发电站的一个特有问题,由于氢气是最轻的易燃易爆气体,氢气储存装置、输送管道、阀门管件、PEMFC 电堆以及电堆运行的定时排空都可能引起氢气泄漏,为防止电站空间集聚氢气的浓度超过爆炸极限,必须实时检测、报警并进行排放处理。

氢气安全监控与排放消除装置由氢气敏感传感器、监控报警器及排放风机、管道和消氢器等组成,传感器必须安装在电站空间的最高处。冷却水箱或余热处理系统是吸收或处理 PEMFC 发电机运行产生的热量,保障电站环境不超温,特别是将余热进行再利用,如与燃气轮机配合实现热电联产联供,可大大提高燃料利用效率。

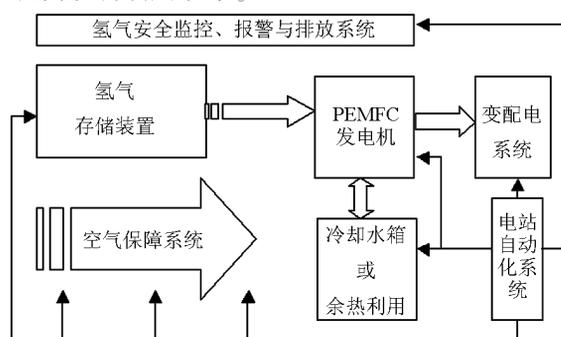


图 4 PEMFC 发电站组成示意图

Fig. 4 Composition diagram of PEMFC power plant

电气系统根据整体供电方式和结构对 PEMFC 发电机发出电力进行处理后与电网并联运行或/直接向负载供电。电站自动化系统是为保障 PEMFC 发电站正常工作、可靠运行而设置的基于计算机参数检测与协调控制的自动装置,是 PEMFC 电站信息化、智能化的核心。

2.3.3 氢能发电站的效率

燃料电池在将燃料的化学能转化为电能的过程中必然会造成部分能量损失,能量转换效率直接反应能量损失的大小。

根据热力学的法则,燃料的化学能不可能完全转化为电能。

燃料氢 H_2 的总能量可用焓 H 表示,它包含吉布斯自由能 G 与不可用能 TS 。当系统在定温、定压的条件下,发生化学反应时,自由能变化量可以写成:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (8)$$

对于以氢气作为燃料的电池反应, $T\Delta S$ 是不可能转变为电能的, 电池所能提供的最大电能即是反应的吉布斯自由能变 ΔG , 则此时燃料电池的效率为理想效率:

$$\eta_n = \frac{\Delta G}{\Delta H} \times 100 \% \quad (9)$$

式(9)中, ΔG 为燃料电池反应的标准生成吉布斯能变, kJ/mol ; ΔH 为燃料电池反应的标准生成焓变, kJ/mol 。

对于标准状态(298 K, 101 325 Pa), 查热力学物理手册可知 ΔG 和 ΔH 的值。

燃料电池的理想电势:

$$E_n = \frac{-\Delta G}{n \cdot F} \quad (10)$$

式(10)中, n 为反应电子数; F 为法拉第常数。

在实际电池中, 燃料的化学能是不可能完全转变为电能的, 当燃料电池工作时, 电极上会发生一系列物理与化学变化过程, 如气体扩散、溶解、吸附、脱离、析出等。为使电板上的反应能够持续进行, 就必须消耗自身的能量去克服这些阻力, 电极电势就会偏离理想电势 E_n , 出现极化现象。根据产生极化的原因不同, 可以归纳为 3 种: a. 活化极化; b. 浓度极化; c. 欧姆极化, 因此, 燃料电池的工作电压为理想电压减去所有极化造成的电势:

$$E_{\text{cell}} = E_n - b \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) + B \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) - iR_\Omega \quad (11)$$

式(11)中, i_0 , R_Ω , B 与 b 统称为 Tafel 参数; i_L 为限制电流密度; i_0 为交换电流密度; R_Ω 为燃料电池的全部阻抗。 i_L , i_0 和 R_Ω 可从实验中直接测量, B 和 b 可从燃料电池极化曲线经拟合确定。

现假定电池反应的焓变可以完全转化为电能, 则电池的电压为:

$$E_h = -\frac{\Delta H}{n \cdot F} = \begin{cases} 1.48 \text{ V} & \text{以 HHV 计算} \\ 1.25 \text{ V} & \text{以 LHV 计算} \end{cases} \quad (12)$$

燃料电池的效率

$$\eta_e = \frac{E_{\text{cell}}}{E_h} \times 100 \% \quad (13)$$

如果燃料的利用率为 μ , 则燃料电池的效率为:

$$\eta_{\text{cell}} = \mu \cdot \eta_e \quad (14)$$

氢能发电系统除燃料电池外, 还包括燃料与空气循环系统, 冷却系统以及电能变换系统, 所有这些辅助系统所消耗和损失的能量用 W_{loss} 表示, W_{loss} 对

应的电压损失为 E_{loss} , 则氢能发电站的效率^[2]:

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{\mu E_{\text{cell}} - E_{\text{loss}}}{E_h} \times 100 \% \quad (15)$$

2.4 互补发电系统

2.4.1 风氢互补发电系统的结构

风氢互补发电的核心是“削峰”、“填谷”, 即将风力发电高峰期多余的电能用于制氢储氢, 再将储存的氢能发电来补充风力发电低谷期不足的电能。因此设计风氢互补发电系统的结构由风力发电、制氢储氢、氢能发电 3 大子系统以及控制器构成, 如图 5 所示, 其中控制器用于控制开关 K_1 , K_2 , 当风力发电波峰时开关 K_1 闭合, K_2 打开, 多余的电能制氢储氢; 波谷时开关 K_1 打开, K_2 闭合, 氢能发电补, 并网至电力系统, 以补充风力发电不足部分的电能。

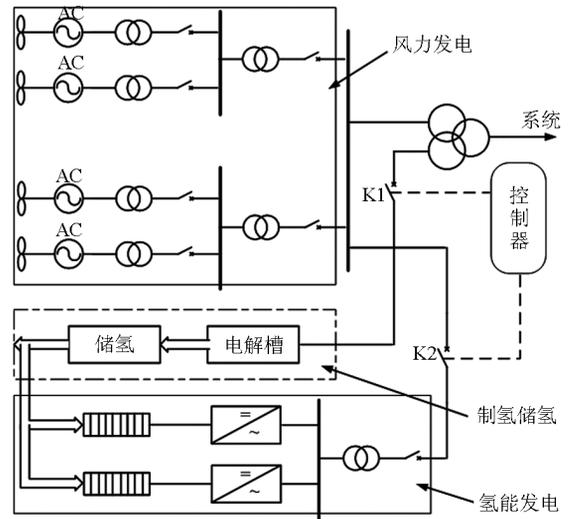


图 5 风氢互补发电系统的结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of the wind and hydrogen power electric generating system

3 风氢互补发电系统发电量配比计算步骤

1) 收集当地风能资源和其他天气及地理环境数据(如经、纬度及海拔; 每个月份的风速、风向、年风频数据、年最长持续无风天数、年最大风速及发生月份, 韦布尔分布系数等), 预测调度时段内风电场每日的日平均发电量 W_i , 计算调度时段内日平均发电量的总平均值 W_{av} 。

2) 确定风氢互补发电系统能恒定输出的日发电量 W_c :

$$W_c = W_{\text{av}}(1 - \eta_e - \eta_\mu) - W_{\text{loss}} \pm \Delta W \quad (16)$$

式(16)中, W_{loss} 为制氢及氢能发电过程中由制氢效率与氢能发电效率引起; η_e 为能量裕度; η_μ 为制氢、储氢及氢能发电过程中因泄露等原因造成的能量损

失; ΔW 为调度因子, 由调度要求及储氢量决定。

3) 根据调度时段内的总盈余发电量计算所能产生的氢气量 Q 。

调度时段内的总盈余发电量:

$$W_{\Sigma} = \Sigma(W_i - W_c) \quad (W_i > W_c) \quad (17)$$

式(17)中, W_i 为第 i 天风电场的日平均发电量预测值

$$Q = W_{\Sigma} \times \eta_t \times \rho \quad (18)$$

式(18)中, η_t 为制氢效率; ρ 为每度电的制氢量, $\text{m}^3 / (\text{W} \cdot \text{h})$ 。

目前通过电解水装置制得 1 m^3 氢气的实际电能消耗为 $4.5 \sim 5.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

4) 确定调度时段内氢能发电站需要补充的发电量及所需要的氢气量。计算调度时段内氢能发电站需要补充的发电量 W_q

$$W_q = \Sigma(W_c - W_i) \quad (W_c > W_i) \quad (19)$$

式(19)中, W_i 为第 i 天风电场的日平均发电量预测值。计算生产 W_q 所需要的氢气量 Q_q

$$Q_q = W_q \times \mu / \eta_{\text{sys}} \quad (20)$$

式(20)中, μ 为生产每度电所需要的氢气量, $\text{m}^3 / (\text{W} \cdot \text{h})$; η_{sys} 为氢能发电站的效率。

理论上, 燃料电池阳极上每一个氢分子反应后可以释放两个电子, 1 个电子带 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 的电量, 而 1 mol 电子相当于 6.022×10^{23} 个电子, 因此 1 mol 电子则带有 96487 C 电量, 由此可计算生产 1 度电需要的氢气量为 0.6434 m^3 [3]。

5) 确定氢能发电站的容量。风氢互补发电系统可以在 3 种模式下运行, 即: a. 风电场独立向电网发电, 即 $W_i \geq W_c$ 时; b. 风能及氢能联合向电网发电, 即 $0 < W_i < W_c$ 时; c. 氢能发电站独立向电网发电, 即 $W_i = 0$ 时。

风氢互补发电系统工作在 c 模式下的连续时间, 也就是氢能发电站满负荷连续发电的时间, 由此可计算氢能发电站的总装机容量:

$$S = W_c / 24 \lambda \cos \varphi \quad (21)$$

式(21)中, λ 为设备利用率。

4 案例计算

如东风电场位于江苏如东海岸上, 有环港和凌洋两个风电场, 共有 39 台 $1.5 \text{ sle}/50 \text{ Hz}$ 风力发电机组, 每台风机额定输出功率为 1500 kW 。图 6 为如东风电场 2008 年 1—9 月的月发电量。从图 6 可知, 由于气候原因, 每月的发电量变化较大, 因此选择的调度周期不能太长, 考虑到能可靠预测发电量的时间周期, 选择调度周期为 7 天。图 7 为如东风电场 2008 年 9 月的日发电量, 现以 7 天为一周期, 将其分为 4 个调度周期, 由公式(16)至(20)计算出每个周期的周平均发电量 W_{av} 、周恒定输出的日发电量 W_c 、周总盈余发电量 W_{Σ} 、周制氢量 Q 、氢能发电站的发电量 W_q 如表 1 所示。

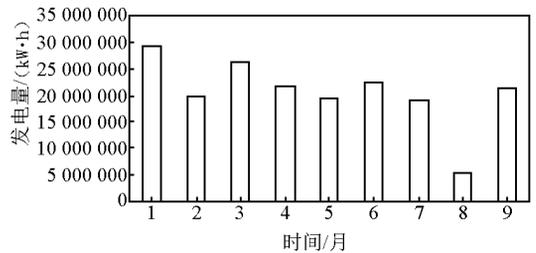


图 6 2008 年 1—9 月如东风电场的发电量

Fig. 6 Electric energy production in the Rudongfeng Power Plant from January to September in 2008

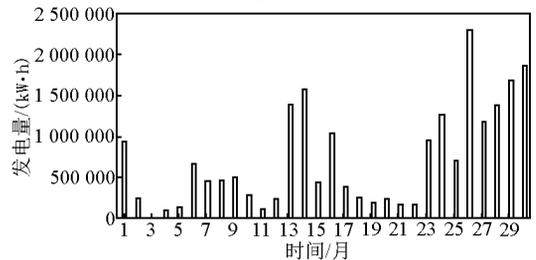


图 7 如东风电场 2008 年 9 月的日发电量

Fig. 7 Day output of electric energy in the Rudongfeng Power Plant in September 2008

表 1 如东风电厂发电量值

Table 1 Generating magnitude of Rudongfeng Power Plant

日期	日平均发电量 W_{av} / (kW·h)	日恒定输出的发电量 W_c / (kW·h)	周总盈余发电量 W_{Σ} / (kW·h)	周制氢量 Q/m^3	周氢能总发电量 W_q / (kW·h)	氢发电需要的氢气量 Q_q/m^3
9 月 1 日至 9 月 7 日	363 267	196 164	1 522 994	380 749	353 273	378 815
9 月 8 日至 9 月 14 日	650 397	390 238	2 364 665	591 166	543 554	582 853
9 月 15 日至 9 月 21 日	387 403	271 182	1 030 402	257 600	216 855	232 534
9 月 22 日至 9 月 28 日	1 136 800	795 760	2 473 568	618 392	535 523	574 241

分析计算结果可以得出:

1) 文章提出并构建的风氢互补发电系统方案可以使整个发电系统在某一时段内保持平稳出力,缓解风电场由于负荷的波动而对电网电压和频率造成的不利影响。

2) 在储氢容量允许的范围内,风氢互补发电系统的发电量可以根据电网调度要求进行调整,改善风电场发电量不可控的问题。

3) 通过适当调整调度因子,可以保证在调度周期内利用周总盈余发电量 W_s 生产的氢气量 Q 满足氢能发电站“填谷”所需要的氢气量 Q_v 。

4) 9 月份的最大日恒定输出的发电量 $W_c = 795\ 760\ \text{kW}\cdot\text{h}$,按公式(21)的计算,并考虑一定的裕度,氢能发电站的容量应在 40 MVA,大容量氢能发电站的建设还有待于燃料电池技术的实用化进程。

5 结语

文章从理论上构建了一种新型的风氢互补发电系统,采用“波峰”制氢进行“削峰”、“波谷”氢气发

电进行“填谷”的方式平衡风电场的出力波动,使得整个互补系统输出稳定的出力,解决由于风速的随机性和波动性造成大规模开发风电时,风电场负荷的波动对电网电压和频率造成的不利影响。解决由于风能大规模开发所带来的负荷波动问题,该方法非常有前景。

因该新型的互补发电系统在国内外还没有看到相关的研究文献,此处只是做一个初步的探讨。在今后的研究中,将对这一方案的互补发电系统进行详细的经济成本分析,探讨不同的调度方案对系统经济性的影响,研究互补系统中经济性对主要参数的敏感性。

参考文献

- [1] 刘明义,于波,徐景明. 固体氧化物电解水制氢系统效率[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 868-871.
- [2] 黄镇江. 燃料电池及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [3] 张文强,于波,陈靖. 高温固体氧化物电解水制氢技术[J]. 化学进展, 2008, 20(5): 778-787.

A preliminary study on the construction of wind and hydrogen power electric generating system

Xu Ye , Chen Xiaoning

(PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

[Abstract] To deal with the unstable stability of output power and the volatility of voltage in the wind power generation, a wind and hydrogen power electric generating system was put forward in the paper to break through the grid-connected bottleneck. In the system, the controllable output, which corresponds to “valley” of the wind power generation output, is used as the guarantee steady output power for the wind power plant, and the uncontrollable output corresponding to the part between “peak” and “valley” is adopting the peak load shifting mode to balance. In the mode, the “peak” is used for hydrogen generation to “cut the peak” and the “valley” is used for electric power generation by hydrogen to “fill the valley”. What is more, as an example, the Rudongfeng Power Plant was introduced to complete corresponding analysis and computation, and the result showed that the system can guarantee the balance of power output mostly and it can be a feasible and effective way to solve the grid-connection of wind power generation.

[Key words] wind power generation; hydrogen power generation; hydrogen production and storage