

钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究

李国杰¹, 唐志伟², 聂宏展², 谭靖¹

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084; 2. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 由于风电的随机波动性, 大量风电的并网给电网带来了影响, 利用储能系统平抑风功率波动的研究变得愈加重要。以钒液流电池 (Vanadium Redox Flow Battery, VRFB) 为储能元件研究其风电平抑控制策略, 建立反映 VRFB 充放电特性的仿真模型。以钒氧化还原液流电池电化学交流阻抗等效电路为基础, 对等效电路重要参数的变化规律做了分析与简化, 建立了反映钒液流电池充放电特性的数学模型。以 AC/DC 变换器的功率解耦控制为基础, 建立了基于 VRFB 储能系统的平抑风电波动控制策略。以某风场的实测风速数据和 1.5 MW 双馈电机为例, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件, 验证了控制策略的有效性和可行性。

关键词: 钒氧化还原液流电池; 风力发电; 储能系统; 平抑控制

Modelling and controlling of vanadium redox flow battery to smooth wind power fluctuations

LI Guo-jie¹, TANG Zhi-wei², NIE Hong-zhan², TAN Jing¹

(1. State Key Laboratory of Power System, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: High randomness of wind power brings a big problem to power grids. Thus, attenuation of wind power fluctuation through energy storage systems becomes more and more important. In this study, Vanadium Redox Flow Battery (VRFB) is proposed as the storage system to smooth wind power fluctuation. Based on an equivalent circuit of electric-chemical AC impedance of VRFB, the change law of main parameters in the equivalent circuit is analyzed and simplified, and the mathematical model is analyzed and established to show charge and discharge characteristics of VRFB. A control scheme of VRFB is proposed based on power decoupling method of an AC/DC converter to smooth wind power. Taking the measured data in a practical wind farm and 1.5 MW double-feed motor as examples, the effectiveness and feasibility of the control strategy of VRFB are verified using PSCAD / EMTDC simulation software package.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50977050 and No. 50823001).

Key words: vanadium redox flow battery (VRFB); wind power generation; energy storage systems (ESS); smooth control

中图分类号: TM712; TM912 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0115-05

0 引言

作为清洁、环保的可再生能源, 风电在我国和世界其他国家迅速发展。目前, 风力并网发电成了发展最快、技术最成熟的新型可再生能源发电形式^[1-2]。然而由于风能的随机波动, 使得大规模风电接入严重影响电网的稳定运行^[3]。采用储能技术对功率进行调节将能够很好地解决这个问题。

钒氧化还原液流电池以其显著的优点成为风电

储能的最佳选择之一^[4], 其优点如下:

- 1) 造价较低, 使用寿命长, 可达 15~20 年;
- 2) 无毒, 有利于环保;
- 3) 功率和容量可以灵活改变;
- 4) 可以 100% 深度放电, 而且无需保护;
- 5) 保存期无限, 储存寿命长。

本文以钒液流电池为储能元件, 研究其平抑风电波动的控制策略。首先建立反映 VRFB 充放电特性的仿真模型。以电化学中钒液流电池交流阻抗等效电路为基础, 分析了等效电路中主要参数的变化规律, 以此建立了反映钒液流电池充放电特性的等效数学模型, 并通过仿真软件 PSCAD/EMTDC 进

基金项目: 国家自然科学基金 (50977050, 50823001); 清华大学自主课题 (2009THZ07060, SKLD09M28)

行验证。以 AC/DC 变换器功率解耦控制为基础，建立了基于 VRFB 储能系统的平抑风电功率波动的控制策略；利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件，研究储能系统对 1.5 MW 双馈风力发电功率波动的平抑效果，仿真结果表明所提出的 VRFB 储能控制策略能够有效地平抑风电波动。

1 以交流阻抗法为基础的钒液流电池建模

1.1 钒液流电池的建模

文献[5]通过对钒氧化还原液流电池的交流阻抗测试和交流阻抗曲线的拟合，得到忽略短时间影响因素、忽略机理不明因素的高频区钒液流电池内阻等效示意图如图 1 所示。

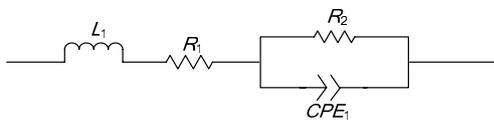


图 1 钒电池等效电路

Fig.1 Electrical equivalent circuit of VRFB

图 1 中， L_1 为电池的电感； R_1 为电池的欧姆阻抗； R_2 为电池的电荷转移阻抗； CPE_1 为恒相位元素；由分析得知 L_1 的值很小，与 R_1 和 R_2 相差 7 个数量级，所以将其忽略^[5]。

并且在文献[5]提供了恒定电流条件下钒液流电池充放电特性曲线（单电池），如图 2 所示。其中纵轴为电池的端口电压，横轴为与容量有关的充放电时间。

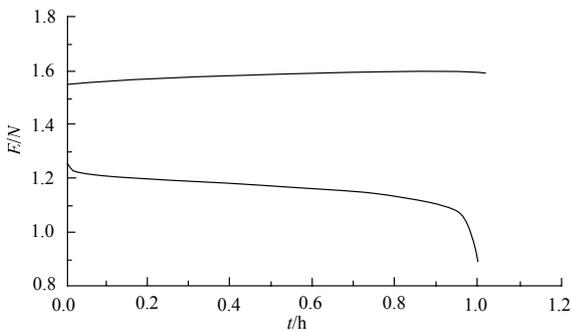


图 2 液流电池充放电特性曲线

Fig.2 Charging and discharging characteristics of VRFB

图 1 所示的交流阻抗等效电路各参数的变化规律如下^[5]。

R_1 包含了电极电阻、电极与电解液接触电阻、电解液电阻和隔膜电阻。它在充电过程中随着电流的增大而增大，而在放电过程中随着电流的增大先减小后增大，并且当端口电压低于某一值时（由于电量变低）钒液流电池内部的电场强度降低，电解液阻抗，交换膜阻抗都会相对增加， R_1 也会快速增加；

R_2 反映了电荷穿越电极和电解质两相界面的转移过程，其值随电流的增大而增大，充放电过程阻值差异明显；同样当端口电压低于 V_n 时（由于电量变低）电荷穿越电解质的能力减弱，这使 R_2 增加。

CPE_1 表征了由于系统电极不均匀引起的阻抗变形，其值介于 Warburg 阻抗（化学中其交流阻抗图呈现与实轴夹角近似 45° 的直线，它相当于电极反应的扩散过程）^[6]与容性之间，充电时更近似容性，放电时近似 Warburg 阻抗，但在单独的充电和放电过程中变化不大。

根据 R_1 变化规律建立数学模型如式（1）：

$$R_1 = \begin{cases} R_{11} + k_{11}|i| & i < 0(\text{充电状态}), V > V_n \\ R_{12} + k_{12}|i - i_0| & i > 0(\text{放电状态}), V > V_n \\ R_{13} + (V - V_n)^2 & i > 0(\text{放电状态}), V < V_n \end{cases} \quad (1)$$

式（1）中： R_{11} 和 R_{12} 分别为液流电池在充电和放电状态下 R_1 的基值； k_{11} 和 k_{12} 为充放电电流变化引起 R_1 变化的比例系数； i_0 为 R_1 取最小值时的放电电流； i 、 V 为当前电池端口电流和电压； $|i - i_0|$ 表征 R_1 在放电状态时随电流增大先变小后变大的变化规律； V_n 为端口电压阈值， $(V - V_n)^2$ 表示当端口电压低于阈值 V_n 时 R_1 将迅速增大的变化规律。

根据 R_2 变化规律建立数学模型如式（2）：

$$R_2 = \begin{cases} R_{21} + k_{21}|i| & i < 0(\text{充电状态}), V > V_n \\ R_{22} + k_{22}|i| & i > 0(\text{放电状态}), V > V_n \\ R_{23} + k_{23}(V - V_n)^2 & i > 0(\text{放电状态}), V < V_n \end{cases} \quad (2)$$

式（2）中： R_{21} 和 R_{22} 分别为液流电池在充电和放电状态下 R_2 的基值； k_{21} 和 k_{22} 为电流变化引起 R_2 变化的比例系数； k_{23} 为和端口电压变化有关的比例系数。

CPE_1 利用电阻和电容串联来模拟。

利用以上分析和参数建模，建立钒液流电池仿真模型，如图 3 所示。

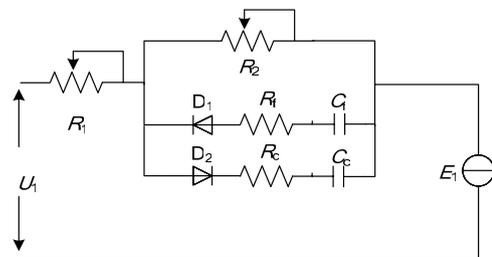


图 3 钒液流电池模型

Fig.3 The model of vanadium redox flow battery

图 3 中 R_1 和 R_2 分别用外控可变电阻实现, 阻值与电压和电流构成的函数关系如式 (1)、(2) 所示。 D_1 和 D_2 为二极管。 R_f 和 C_f 为放电回路的电阻和电容, R_c 和 C_c 为充电回路的电阻和电容。 E_1 表征液流电池内部理想直流电压源, 它的电压随液流电池所存电量的变化而变化, 利用理想电容模拟。

1.2 钒液流电池模型的测试

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件的环境下搭建模型并进行测试, 以 40 个单电池组成电池堆的参数为例进行模拟, 额定电压为 50 V, 额定电流为 50 A, 工作电压范围为 40~64 V; 充电过程先采用 50 A 恒流充电模式, 当液流电池的端口电压到达 64 V 时切换到 64 V 恒压充电模式, 直至充电电流小于 5 A 时结束。 放电过程利用恒压源先将模拟液流电池内部直流电压源的电容充电至 64 V, 再以 50 A 恒流放电, 直至液流电池的端口电压小于等于 40 V 时结束。 仿真模型的参数说明见附录 A。

图 4 中纵轴为端口电压 (Terminal Voltage), 横轴为模拟的液流电池电量 (Capacities)。

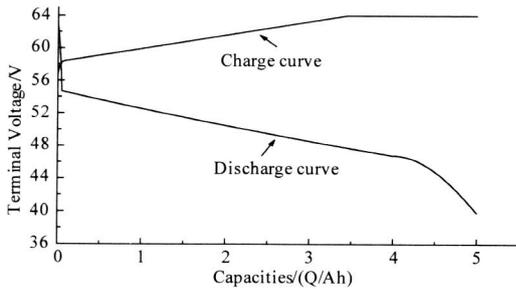


图 4 钒液流电池模型充放电特性曲线图

Fig.4 Charging and discharging characteristics of VRFB's model

由图 4 可知, 液流电池模型在充放电过程中其端口电压变化可分为三个阶段。

在充放电初期, 由于电池的等效内阻分压引起液流电池的端口电压在很短的时间内变化。

充放电中期, 钒液流电池的端口电压近似线性变化, 这是因为在此期间充放电的电流不变, 内部阻抗不变。

在充电末期采用 64 V 恒压充电, 这时充电电流逐渐减小, 内部等效直流源电压逐渐增大, 内部阻抗随充电电流的减小而减小, 内部阻抗的分压也减小; 在放电末期, 钒液流电池的端口电压快速减小, 这一方面是由于内部等效源的电压随所存电量的减小而减小, 另一方面是因为这时端口电压小于阈值 V_n , 内部电抗迅速增大, 内阻分压增大。

通过对比模型的充放电曲线图 4 和实际液流电池的 (单电池) 充放电特性曲线图 2, 可以清楚地看出, 此仿真模型可以比较精准地模拟液流电池充

放电的动态特性。

基于以上所建立的钒液流电池模型, 构建 VRFB 储能系统, 研究平抑风功率波动的控制策略。

2 储能系统的控制策略

2.1 双馈风力发电机储能系统

本文储能系统与单台风力发电机的连接如图 5 所示, 在双馈电机的交流端连接储能装置, 这样不影响双馈风电机组的控制, 储能控制方法更加灵活。

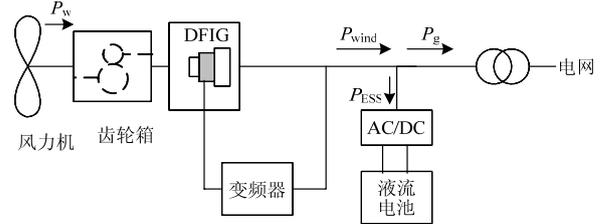


图 5 储能装置连接风电双馈示意图

Fig.5 The diagram of ESS connecting with a DFIG system

图 5 中, P_w 为风力机输出的功率, P_{wind} 为风力发电机的输出功率, P_{ESS} 为储能系统平抑的功率, P_g 为经过平抑后输入到电网的功率。

2.2 AC/DC 双向变换器功率的解耦控制

储能系统 AC/DC 双向变换器采取基于 IGBT 的电压源换流技术, 其 dq 旋转坐标系下电压方程如式 (3) 所示^[7-8]。

$$\begin{cases} u_d = e_d - (Lp + R)i_d + \omega Li_q \\ u_q = e_q - \omega Li_d - (Lp + R)i_q \end{cases} \quad (3)$$

有功功率和无功功率为:

$$\begin{cases} P = u_d i_d + u_q i_q \\ Q = u_q i_d - u_d i_q \end{cases} \quad (4)$$

式 (3) 和式 (4) 中: P 、 Q 为变换器输出的有功功率和无功功率; u_d 、 u_q 为变换器交流侧电压的 d、q 轴分量; i_d 、 i_q 为变换器交流侧电流的 d、q 轴分量; e_d 、 e_q 为电网电压的 d、q 轴分量; L 、 R 为变换器内部的电感、电阻; p 为微分算子。

根据交流电压 q 轴定向原则, 则 $u_d = 0$, $u_q = u_s$, 从而使 P 、 Q 实现解耦控制^[7-8]。

储能系统的解耦控制策略框图如图 6 所示。

图 6 中, P_{ref} 和 Q_{ref} 为有功功率和无功功率的控制参考值, u_{dc} 为液流电池端口直流电压, PI 表示比例积分控制。

根据极点配置原则, 选择控制参数, 保证闭环控制系统的稳定性。

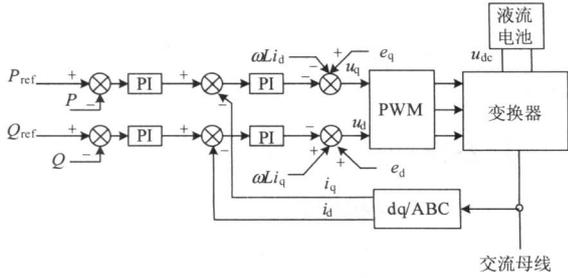


图 6 AC/DC 变换器解耦控制策略框图

Fig.6 Decoupling control diagram of AC/DC converter

2.3 风能平抑的控制目标

风能经过风力发电机转换为电能，风速的不断变化引起了风力机的输出功率 P_w 的变化，按变化的频率范围可将 P_w 分为三部分^[9]：高频区（1 Hz 及以上）、低频区（0.01 Hz 及以下）和它们之间的中频区。高频区这部分功率被发电机的转子惯量吸收；低频区的功率由于变化缓慢，被与其相连电网中的 AGC 补偿；而中频区的功率是影响相连电网最严重的，也是储能装置要平抑的部分^[10]。

因为转子惯量对高频区功率的平抑，所以发电机输出功率 P_{wind} 的波动范围仅在中频区和低频区。因此有式（5）功率分配关系：

$$P_{wind} = P_{ESS} + P_g \quad (5)$$

为了平抑风能的需要，储能系统（ESS）所要平抑的功率 P_{ESS} 为^[10]：

$$P_{ESS} = \frac{\tau s}{1 + \tau s} P_{wind} \quad (6)$$

式（6）中： P_{wind} 为风力发电机组的输出功率；而 $\frac{\tau s}{1 + \tau s}$ 为高通滤波器， τ 为时间常数， $\tau = 1/2\pi f_c$ ， f_c 为截止频率；

注入到电网的功率 P_g 为式（7）所示：

$$P_g = \frac{1}{1 + \tau s} P_{wind} \quad (7)$$

式（7）中的 $\frac{1}{1 + \tau s}$ 为低通滤波器，因此 P_g 为风电输出功率经过储能系统平抑后注入到电网的功率。

因此，图 6 中所示的储能系统控制策略中，输出有功功率参考值 P_{ref} 为 $-P_{ESS}$ ；输出无功功率的参考值 Q_{ref} 可设为 0，也可以根据实际需要进行设置。需要指出的是，低通滤波器的参数选择并不影响 VRFB 储能控制系统的稳定性。

3 仿真验证

利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC，以 1.5 MW 双馈电机为例^[11]，模拟并验证钒液流电池储能系统的风电功率平抑效果，模型结构参看图 5。仿真选用的液流电池容量为风力发电机容量的 0.3 倍^[9]，仿真时间为 24 h。控制参数见附录 B。

仿真输入的风速为我国内陆某风场 4 月初某天的实测风速数据，如图 7 所示。

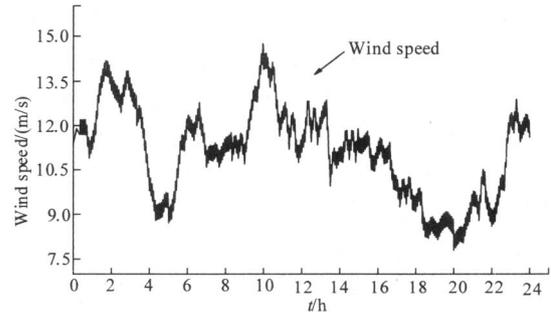


图 7 实测风速曲线图

Fig.7 Practical wind speed

仿真中，双馈电机运行在最大风能捕获状态，当风速为 13 m/s 时风电机组输出功率达到最大，风速大于 13 m/s 时输出的功率不变，储能系统对风电机组输出功率的平抑效果如图 8 所示。

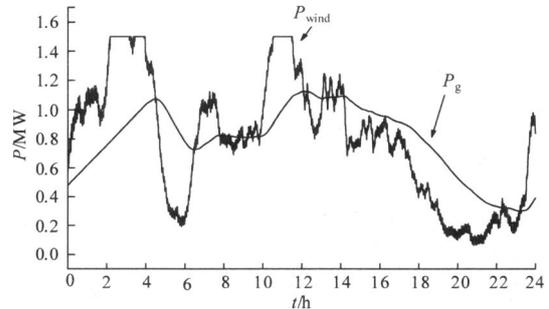


图 8 风能平抑效果示意图

Fig.8 Smoothed wind power with ESS

从图 8 中可以看出，风力发电机的输出功率 P_{wind} 随风速剧烈波动，例如在图 8 中 12 时到 14 时之间，风力发电机的输出功率的最大变化率大于 0.25 MW/（10 min）而平抑后小于 0.02 MW/（10 min）。因此经过储能系统平抑后，输入到电网的功率 P_g 变得很平滑。

图 9 为钒液流电池储能系统的功率变化曲线图，图中 P_{ESS} 为正时，表示储能系统（ESS）吸收功率，液流电池处于充电状态； P_{ESS} 为负时，表示储能系统输出功率，液流电池处于放电状态；曲线与 $Y=0$ 的交点为液流电池充放电状态的转换点。

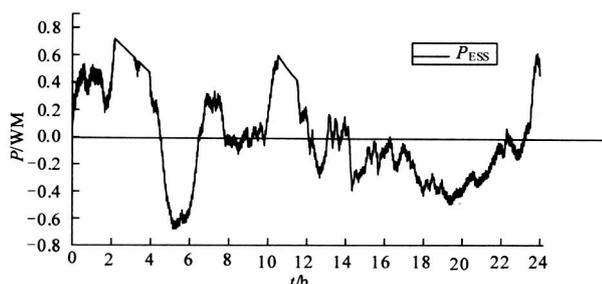


图9 储能系统功率变化曲线

Fig.9 Output power of ESS

图10为 P_{wind} 和 P_g 的频谱分析比较,从图中可以清楚地看出,中频区(1~0.01Hz)内0.04 Hz和0.1 Hz的位置上 P_{wind} 各出现了一次幅值较大的峰值,在 P_g 的频谱曲线上没有出现,并且 P_g 的幅值与 P_{wind} 的幅值相比小了很多,因此中频区内的功率得到很好的抑制。

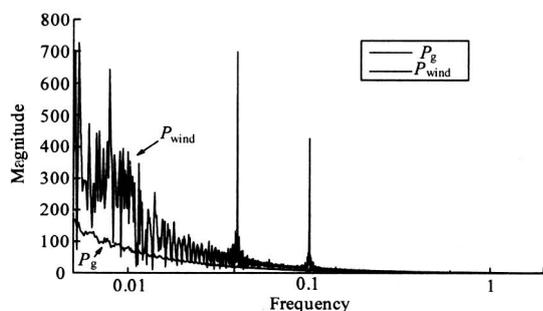


图10 风功率的频谱波动比较图

Fig.10 Fluctuations spectrum of the wind power comparison

4 结论

本文仿真及模型搭建的参数全部来自于实际数据,并利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行仿真,所以研究结果具有普遍的实际意义。

得到的主要结论有:

(1) 根据钒液流电池充放电过程中内部电抗的变化规律,建立了钒液流电池内阻与充放电电流和当前电池电压(电量)的函数关系;由测试可知,模型能够较好地反映钒液流电池的充放电特性。

(2) 将低通滤波器滤过的风功率作为控制目标,与 AC/DC 变换器功率解耦控制相结合,建立了储能系统的控制策略。仿真结果表明,所提出的液流电池储能系统控制策略能够有效地平抑风电功率波动。

(3) 风力发电与储能系统配合后,有利于风力发电机最大风能捕获控制的实现,实现风能的最大利用,有利于与风电机组相连电网的稳定运行,为风电大规模并网创造更好的环境。

附录

A. 液流电池的仿真测试模型主要参数

仿真中 R_1 模型的参数为: $R_{11}=0.058 \Omega$, $R_{12}=0.056 \Omega$, $R_{13}=R_{12}+k_{12}\times|i_0|$, $k_{11}=k_{12}=4.5\times 10^{-5}$, $i_0=53 \text{ A}$, $V_n=45 \text{ V}$ 。

仿真中 R_2 模型的参数为: $R_{21}=0.163 \Omega$, $R_{22}=0.089 \Omega$, $R_{23}=R_{22}+k_{22}\times|i_0|$, $k_{21}=6.03\times 10^{-4}$, $k_{22}=8.94\times 10^{-4}$, $V_n=45 \text{ V}$, $k_{23}=0.53$ 。

CPE_1 的参数为: $R_c=0.042 \Omega$, $R_f=0.037 \Omega$, $C_c=2.653 \text{ mF}$, $C_f=3.979 \text{ mF}$ 。

B. 仿真中主要控制参数

有功 P 控制回路中,功率外环的PI参数为: $T_p=5$, $T_i=0.002 \text{ s}$;电流内环的PI参数为: $T_p=18$, $T_i=0.004 \text{ s}$ 。在无功 Q 控制回路中,无功功率外环的PI参数为: $T_p=5$, $T_i=0.002 \text{ s}$;电流内环的PI参数为: $T_p=4.2$, $T_i=0.002 \text{ s}$ 。

参考文献

- [1] 雷亚洲, GORDON L. 风力发电与电力市场[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 1-5.
LEI Ya-zhou, GORDON L. Wind energy and electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 1-5.
- [2] 王丽婕, 廖晓钟, 高阳, 等. 风电场发电功率的建模和预测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 118-121.
WANG Li-jie, LIAO Xiao-zhong, GAO Yang, et al. Summarization of modeling and prediction of wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 118-121.
- [3] 田春笋, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-51.
TIAN Chun-zheng, LI Qiong-lin, SONG Xiao-kai. Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 46-51.
- [4] 张立, 程杰, 杨裕生, 等. 液流电池旁路电流的研究概况[J]. 电源技术, 2009, 33(2): 144-147.
ZHANG Li, CHENG Jie, YANG Yu-sheng, et al. Research progress of the shunt current in redox flow battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(2): 144-147.
- [5] 罗冬梅. 钒氧化还原液流电池研究[D]. 辽宁: 东北大学, 2005.
LUO Dong-mei. Study on vanadium redox flow battery[D]. Liaoning: Northeastern University, 2005.

(下转第 125 页 continued on page 125)

- 2004, 24 (6): 54-58.
WANG Yao-nan, HUO Bai-lin, WANG hui, et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 54-58.
- [4] 庞清乐, 孙同景, 孙波, 等. 基于蚁群算法的神经网络配电网故障选线方法[J]. 继电器, 2007, 35 (16): 1-6.
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, SUN Bo, et al. Ant algorithm and neural network based fault line selection method for distribution network[J]. Relay, 2007, 35 (16): 1-6.
- [5] 房鑫炎, 郁惟镛. 模糊神经网络在小电流接地系统选线中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26 (5): 15-19.
FANG Xin-yan, YU Wei-yong. Application of fuzzy neural network to grounded line detection in neutral point indirectly grounded power system[J]. Power System Technology, 2002, 26 (5): 15-19.
- [6] 张兆宁, 郁惟镛. 基于小波包变换的模糊神经网络小电流接地系统故障选线[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36 (7): 1012-1015.
ZHANG Zhao-ning, YU Wei-yong. Discrimination of fault line based on wavelet packet and fuzzy neural networks in distribution systems[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2002, 36 (7): 1012-1015.
- [7] Horikawa S, Furuhashi T, Chikawa Y U. On fuzzy modeling using fuzzy neural networks with the back propagation algorithm[J]. IEEE Trans NN, 1992, 3 (5): 801-806.
- [8] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [9] 毕研秋, 赵建国. 基于暂态量和小波包的配电网故障选线方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (6): 17-21.
BI Yan-qi, ZHAO Jian-guo. Fault feeder detection based on transient current and wavelet packet in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (6): 17-21.
- [10] 苏战涛, 吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线新方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 30-33.
SU Zhan-tao, Lü Yan-ping. A new wavelet packet analysis based method to detect fault line for single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28 (12): 30-33.

收稿日期: 2009-06-05; 修回日期: 2010-09-28

作者简介:

张俊芳 (1965-), 女, 副教授, 主要从事电气工程及其自动化专业的教学与研究工作; E-mail: zjf807@163.com

刘 鹏 (1985-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统分析、运行与控制。

(上接第 119 页 continued from page 119)

- [6] Muralidharan V S. Warburg impedance-basics revisited[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 1997, 44 (1): 26-29.
- [7] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] 丁奇, 严东超, 曹启蒙. 三相电压型PWM 整流器控制系统设计方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (23): 84-87.
DING Qi, YAN Dong-chao, CAO Qi-meng. Research on design method of control system for three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (23): 84-87.
- [9] Luo Changling, Banakar Hadi, Shen Baike. Strategies to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (2): 341-349.
- [10] Wei Li, Géza Joós, Chad Abbey. Attenuation of wind power fluctuations in wind turbine generators using a DC bus capacitor based filtering control scheme[C]. //Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE. Tampa: 2006: 216-221.
- [11] 李环平, 杨金明. 基于PSCAD_EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (21): 62-66.
LI Huan-ping, YANG Jin-ming. Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD_EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (21): 62-66.

收稿日期: 2010-06-11; 修回日期: 2010-06-24

作者简介:

李国杰 (1965-), 男, 副教授, 从事电力系统分析与控制、新能源及电能质量的研究; E-mail: liguojie@tsinghua.edu.cn

唐志伟 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电、电力系统继电保护; E-mail: zhiweijl@163.com

聂宏展 (1962-), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行分析与继电保护。