

交直流互联系统电压稳定性研究

高超峰, 康积涛

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 利用分岔理论对交直流互联电力系统电压稳定性进行分析。首先对交直流系统进行数学建模, 给出系统、发电机、励磁系统和直流系统数学模型表达式, 利用连续潮流方法对系统平衡解流形进行追踪并求取分岔点。通过考虑直流电流参考值、励磁系统参考电压等系统参数对电压稳定性的影响, 并利用实际 WSCC9 节点系统进行验证分析。最后通过时域仿真的方法还初步探讨了直流输电线路对整流侧和逆变侧电压的影响。

关键词: 交直流系统; 分岔理论; 电压稳定性; 系统参数; 连续潮流法

Abstract: The voltage stability of AC/DC interconnected power system is analyzed with bifurcation theory. Firstly, the mathematical modeling of AC/DC system is done, and the mathematical expressions of system, generator, excitation system and DC system are given. The continuation power flow method is used to track the equilibrium solution manifold of the system and get the bifurcation point. Considering the influences of system parameters on the voltage stability such as DC reference current, the reference voltage of excitation system, it is verified with the actual WSCC9 system. Finally, the influence of DC transmission line on the voltage of rectifier side and inverter side is discussed with time domain simulation method.

Key words: AC/DC system; bifurcation theory; voltage stability; system parameter; continuation power flow method

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0017-06

0 引言

直流系统由于不存在功角稳定问题, 并且具有快速调节特性^[1], 近来以高压和特高压直流输电为代表的交直流输电系统在中国电网中应用越来越多。相比交流系统, 直流系统具有更多的参数和变量, 并且其中应用大量的电力电子器件, 使得交直流系统具有很强的非线性特性^[2], 在运行中换流器会消耗大量无功功率, 逆变器吸收的无功功率约占直流输送功率的 40% ~ 60%, 这对交流系统的容量提出非常高的要求^[3], 使得系统电压稳定性面临严峻的挑战, 需要深入研究影响系统电压稳定性的因素。

分岔理论是起源于力学失稳现象的一种理论^[4], 1961年 Andronov 和 Neimark 第一次把分岔理论应用到电力系统的研究中, Harry G. Kwantny 等人首次在对电压稳定性的研究中应用分岔理论。目前的分岔分析方法中大多以静态分析方法^[6-7]为主。分岔理论能够更加精确地分析临界点附近系统的稳定性情况^[9]。目前, 利用分岔理论对交直流互联系统电压稳定性的研究还不是很深入, 与交流系统相

比, 直流系统具有更多的动态元件和非线性环节^[10], 为揭示电压失稳的机理, 需要采用微分代数模型, 进入深入研究。

选取更接近实际的交直流系统电压稳定性进行研究, 使得出结论更具有可信度, 通过连续潮流方法^[11]得到系统 PV 曲线并求取系统霍普夫和鞍结分岔点, 通过研究发现系统参数对电压稳定的影响作用, 最后, 通过时域仿真^[11]的方法, 观察整流侧和逆变侧电压在 Hopf 分岔点电压随时间的变化情况, 得出影响交直流系统电压稳定的一些结论。

1 电力系统的系统模型

一般电力系统电压稳定性分析中, 电力系统的模型可以表示为一组微分-代数方程组^[5]。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (1)$$

式中, 令 $x = (\sigma, \omega, E'_q, E'_d, E'_{fd}, \mu_R, R_F)$ 为系统中的微分变量; $y = (u, \theta)$ 为系统中的代数变量; $\mu = (P_1, Q_1)$ 为系统的控制参数(也可以选其他变量)。为了考察式(1)系统的动态稳定性, 在平衡点对式(1)进

行微分变换。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = D_x f(x_0, y_0) \cdot dx + D_y f(x_0, y_0) \cdot dy \\ 0 = D_x g(x_0, y_0) \cdot dx + D_y g(x_0, y_0) \cdot dy \end{cases} \quad (2)$$

对上式进行变换得到系统的雅可比矩阵 $J = A - BD^{-1}C$ $A = D_x f(x_0, y_0)$ $B = D_y f(x_0, y_0)$ $C = D_x g(x_0, y_0)$ $D = D_y g(x_0, y_0)$,由分岔理论可知系统的稳定性完全由这个矩阵的特征值决定。

1.1 同步发电机的数学模型

同步发电机的运行特性在电力系统中起着举足轻重的作用,在对电力系统电压稳定性问题进行分析和研究的过程中,发电机是必须要考虑的因素之一。作为一种复杂的旋转设备,在发电机的建模中一般都应用随电机同步旋转的 $d-q$ 坐标系,于是要首先对基于同步坐标 $x-y$ 分量进行机网变换。针对不同的具体问题,发电机根据转子绕组数的不同采用不同的模型。这里采用 IEEE 双轴 4 阶模型,主要考虑转子绕组的暂态过程而忽略次暂态过程和定子绕组暂态过程,同时考虑 g 绕组、 f 绕组暂态和转子运动的动态。发电机实用 4 阶模型^[10]如下。

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = (\omega - 1)\omega \\ M\dot{\omega} = T_M + u_1 \left[\frac{E'_d \cos(\theta' - \delta)}{x'_q} + \frac{E'_q \sin(\theta - \delta)}{x'_d} \right] \\ + \frac{u_1^2 \sin 2(\theta_1 - \delta)}{2} \left(\frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) - D(\omega - \omega_0) \\ T'_{d0} \dot{E}'_q = -\frac{x_d E'_q}{x'_d} + \frac{1}{x'_d} [(x_d - x'_d) u_1 \cos(\theta_1 - \delta)] \\ + E_f d \\ T'_{q0} \dot{E}'_d = -\frac{x_q E'_q}{x'_q} - \frac{1}{x'_q} [(x_q - x'_q) u_1 \sin(\theta_1 - \delta)] \end{cases} \quad (3)$$

式中 i 取值由 1 至发电机总数; j 为与节点 i 相连的节点号; δ_i 为第 i 台发电机功角; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电压相角差; g_{ij} 和 b_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电导和电纳。

1.2 励磁系统数学模型

励磁系统的动态特性对系统稳定有着重要的影响,通过励磁电流的调节从而调节无功输出,达到稳定发电机机端电压的目的,这里采用励磁器——IEEE DC I 型励磁器,数学模型采用文献[12]提出的一阶模型。

$$T_A \dot{E}_{jd} = -E_{jd} + K_A (u_{ref} - u_t) \quad (4)$$

式中 T_A 和 K_A 分别为励磁调节器的时间常数和放大倍数; u_{ref} 为励磁参考电压。

1.3 直流系统数学模型

直流系统数学模型一般分为稳态模型、准稳态模型和暂态模型^[13],这里研究小扰动情况下交直流系统的电压稳定性,考虑到直流换流器控制方式的动态行为,直流系统采用准稳态模型。

由于直流线路的两端一般都与交流系统相连接,一端通过整流器把交流变为直流,另外一端通过逆变器把直流变为交流,如图 1 所示。

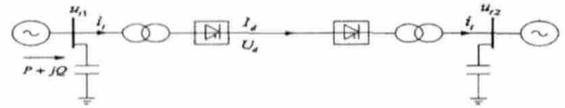


图 1 直流系统结构图

整流器和逆变器原理基本相同,所以统称为换流器,其数学模型如下^[2,14]。

$$\begin{cases} U_d = k_r u_t \cos \theta_d - X_c I_d \\ U_d = k_r k_r u_t \cos \varphi \\ \dot{x}_{rec} = K_I (I_{ref} - I_d) \\ \cos \alpha_{rec} = x_{rec} + K_p [I_{dref} - I_d] \end{cases} \quad (5)$$

式中 k_r 和 θ_d 分别为换流变压器变比和换流器的控制角,最后两个公式说明换流器的控制方式,这里主要研究的是整流器定电流逆变器定熄弧角这种控制方式; K_I 和 K_p 分别为积分放大倍数和比例放大倍数。

考虑到直流线路和控制器的动态过程,直流线路采用 $L-R$ 等值电路,忽略对地充电电容,微分方程^[15]为

$$\dot{I}_d = \frac{1}{L} (U_{drec} - U_{dinv} - I_d R_d) \quad (6)$$

式中 U_{drec} 和 U_{dinv} 分别代表整流侧和逆变侧直流电压; R_d 为直流线路电阻。

1.4 系统网络模型

发电机节点的潮流方程^[16]为

$$\begin{cases} \frac{u_i}{x'_{di}} E'_{qi} \sin(\delta_i - \theta_i) - \frac{u_i}{x'_{qi}} E'_{di} \cos(\delta_i - \theta_i) \\ - u_i \sum_{j=1}^n u_j [g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}] = 0 \\ \frac{u_i}{x'_{di}} E'_{qi} \cos(\delta_i - \theta_i) + \frac{u_i}{x'_{qi}} E'_{di} \sin(\delta_i - \theta_i) - \frac{u_i^2}{x'_{di}} \\ - u_i \sum_{j=1}^n u_j [g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

非发电机节点潮流方程为

$$\begin{cases} u_l \sum_{k=1}^n u_k [g_{lk} \cos \theta_{lk} + b_{lk} \sin \theta_{lk}] + P_l = 0 \\ u_l \sum_{k=1}^n u_k [g_{lk} \sin \theta_{lk} - b_{lk} \cos \theta_{lk}] + Q_l = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 l 为非发电机节点号; k 为与 l 相关联节点号; P_l 和 Q_l 为节点 l 的负荷给定的有功和无功功率。

直流节点的潮流方程为

$$\begin{cases} u_s \sum_{r=1}^n u_r [g_{rs} \cos \theta_{rs} + b_{rs} \sin \theta_{rs}] + P_l \pm U_d I_d = 0 \\ u_r \sum_{s=1}^n u_s [g_{rs} \sin \theta_{rs} - b_{rs} \cos \theta_{rs}] + Q_l + U_d I_d \tan \varphi = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中 r 为直流节点; s 为与直流节点相关联的交流节点; 第一个方程中正号表示整流器端, 负号表示逆变器端。

2 分析理论

2.1 分析理论

在电力系统电压稳定性分析中根据所考虑的动态特性变化范围的不同, 分岔可以分为局部分岔和全局分岔^[20]。局部分岔是单独研究平衡点的某一邻域内向量场的分岔, 常见的有: 鞍结分岔、奇异诱导分岔、霍普夫分岔、极限诱导分岔。这里主要针对交直流系统在霍普夫分岔和鞍结分岔时系统电压稳定特性进行研究。

(1) 霍普夫(Hopf)分岔^[17]

通过选择可控的系统参数在不断变化的过程中, 系统雅可比矩阵的一对共轭特征值从左向右或是从右向左穿越虚轴, 系统发生霍普夫分岔。其中又分为超临界和亚临界霍普夫分岔。

(2) 鞍结分岔(SNB)^[17]

系统初始运行时一般至少有 2 个平衡点, 随着控制参数的不断变化, 相应平衡点也会沿着系统 PV 曲线相互靠近, 当系统参数到达一定临界值时, 两个平衡点会合并为一个, 此时发生 SNB 分岔, 对应系统特征方程有一个零特征值。

2.2 连续潮流法(延拓法)

连续潮流法是对电力系统电压稳定性分析的有力工具, 在对交直流系统电压稳定性分析研究中应用连续潮流方法^[11]追踪系统的平衡解流形并求取分岔点, 这种方法可以避免在临界点常规潮流方程

难以收敛的问题。连续潮流法包含 4 个步骤: 预估、校正、步长控制和参数化^[9]。此方法的基本思想就是从初始运行点开始, 随着控制参数的不断变化, 通过对下一运行点进行预估、校正, 直至绘制出完整的系统 PV 曲线。

在分析中, 一般将系统变量 x, y 统一用 z 表示。 x, y 的维数分别为 p, q , $n = p + q$, 系统的平衡解流形 Φ 可以表示为

$$\Phi = \{z \in R^{n+1} / F(z) = 0\} \quad (11)$$

① 预估^[5]

$$DFz = \left[\frac{\partial F}{\partial z} \right] = \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial z_1 \partial F_1 / \partial z_2 \cdots \partial F_1 / \partial z_{n+1} \\ \partial F_2 / \partial z_1 \partial F_2 / \partial z_2 \cdots \partial F_2 / \partial z_{n+1} \\ \cdots \\ \partial F_{n+1} / \partial z_1 \partial F_{n+1} / \partial z_2 \cdots \partial F_{n+1} / \partial z_{n+1} \end{bmatrix}$$

初始的 3 个点用切向量法进行追踪, 启动算法, 其切向量通过下式求解为

$$\begin{bmatrix} DFz \cdot \tau_1 \\ \tau^2 - 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

从第 4 个点开始, 采用切线加割线的方法^[9]进行追踪, 切向量采用下面方法进行求解^[5]。

$$J_p =$$

$$(-1)^{p+1} \det \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial z_1 \partial F_2 / \partial z_2 \cdots \partial F_1 / \partial z_{p-1} \partial F_1 / \partial z_{p+1} \cdots \partial F_1 / \partial z_{n+1} \\ \partial F_2 / \partial z_1 \partial F_2 / \partial z_2 \cdots \partial F_2 / \partial z_{p-1} \partial F_2 / \partial z_{p+1} \cdots \partial F_2 / \partial z_{n+1} \\ \cdots \\ \partial F_n / \partial z_1 \partial F_n / \partial z_2 \cdots \partial F_n / \partial z_{p-1} \partial F_n / \partial z_{p+1} \cdots \partial F_n / \partial z_{n+1} \end{bmatrix}$$

其中 $p = 1, 2, \dots, n+1$ 。

$V = [J_1, J_2, \dots, J_{n+1}]^T$, $\tau = V / \|V\|$, 即为平衡解流形 Φ 的单位切向量。

设 τ_i 是 z_i 点处的单位切向量, $d_i = z_i - z_{i-1}$ 是 z_i 点和前一个 z_{i-1} 点的割线方向, $p_i = \tau_i + d_i$ 代表切线加割线方法得到的预估方向。这样可以得到最初的预估值 $z'_{i+1} = z_i + h p_i$, h 为步长。

② 校正及参数化^[5]

对初值进行校正采用的是垂直法校正, 然后对预估值进行修正得到准确值, 修正表达式为

$$z_{i+1} = z'_{i+1} - \left[\frac{DFz(z'_{i+1})}{\tau^T(z'_{i+1})} \right]^{-1} \begin{bmatrix} F(z'_{i+1}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过牛顿迭代法求解上述方程组, 直到得到准确解。

③ 步长控制

在算法的实现过程中, 步长选择是一个重要因素: 如果步长太大, 会导致曲线不精确; 步长太小, 虽

3.1 系统参数对电压稳定性的影响

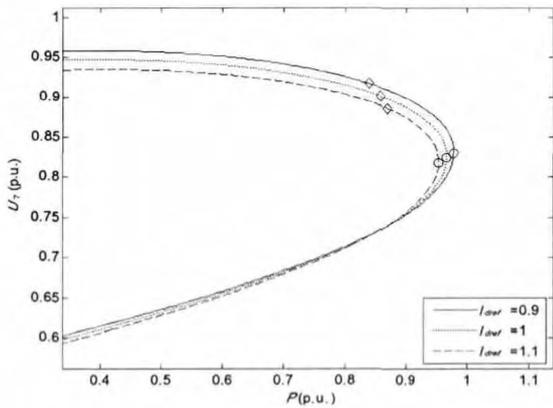


图3 I_{dref} 取不同值时系统 $P-U_7$ 曲线

图3中, \diamond 代表 Hopf 分岔, \circ 代表 SNB 分岔, 通过大量的仿真实验发现, 系统在发生 SNB 分岔之前一般会先发生 Hopf 分岔^[5], 通过对分岔点的时域仿真曲线可以看出, 系统在 Hopf 分岔点处会发生振荡失稳, 所以 Hopf 分岔点处的功率即为系统的传输功率极限^[15]。图3中 I_{dref} 为系统直流电流的参考值, 可以看出随 I_{dref} 的增大 Hopf 分岔点依次发生延迟, 传输功率逐渐增大, 但是, 系统的电压水平降低, 这是由于 I_{dref} 较小时, 直流系统对交流系统的无功需求比较小, 而且能够降低换相失败的可能性^[2]。

从图4可以看出, 当 V_{ref} 为 0.89 时, 此时即使系统负荷比较轻的情况下, 系统还是会比较早的就发生 Hopf 分岔, 说明此时系统非常不稳定; 当 V_{ref} 为 1.5 时, 这时系统在发生 SNB 分岔之前不再发生 Hopf 分岔现象, 可以看出随着 V_{ref} 的不断增大, 系统分岔点不断右移, 说明选取比较高的 V_{ref} 不仅可以提高系统的传输功率极限, 而且还可以消除 Hopf 分岔点, 从而避免系统发生振荡失稳^[21]。

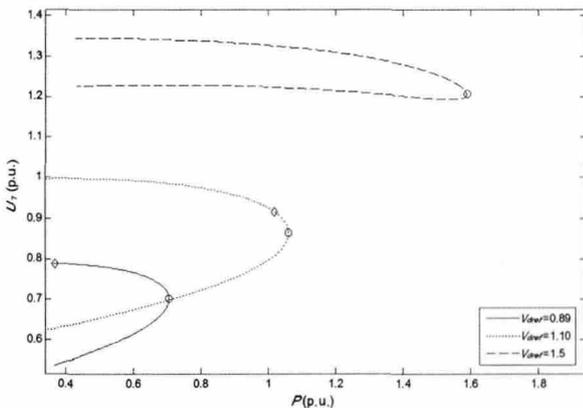


图4 V_{ref} 取不同值时系统 $P-U_7$ 曲线

3.2 直流输电线路对电压稳定性的影响研究

针对所选 WSCC9 交直流系统, 换流器控制方

式选择定电流定熄弧角 (CC/CEA), 在感应电动机负荷下, 应用时域仿真法观察整流侧和逆变侧电压在 Hopf 分岔点处受到扰动后, 电压随时间的变化情况。

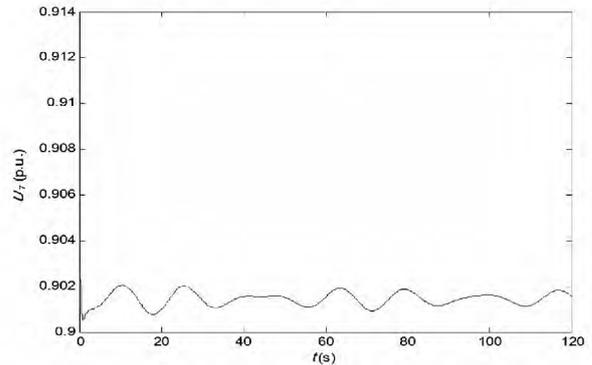


图5 节点7 直流电压的时域仿真曲线

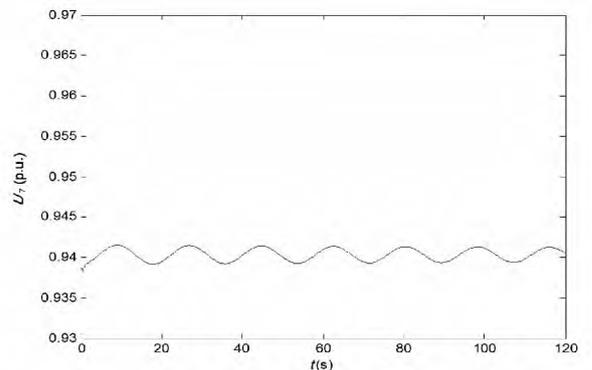


图6 节点8 直流电压的时域仿真曲线

对比图5和图6可以看出, 在 Hopf 分岔点处受到相同大小的扰动, 逆变侧节点电压 U_7 做非等幅振荡, 并且有明显的畸变, 而整流侧节点电压 U_8 做等幅振荡, 这说明了直流系统对两端的影响程度不相同, 这是因为换流设备在扰动发生后快速作用, 通过调节阀的触发角, 改变潮流和电压的大小, 逆变侧由于功率的传输要经过直流线路和换流设备, 所以受直流系统的影响比较大, 逆变侧电压会出现。

4 结 论

通过对发电机、励磁系统和交直流系统网络进行建模, 并考虑交直流系统中换流器及其控制方式等动态变化规律, 运用分岔分析方法, 通过连续潮流方法追踪系统平衡解流形, 并求取霍普夫分岔和鞍结分岔。增大系统直流的参考值可以延迟系统 Hopf 分岔但是以降低系统电压水平为代价的, 所以在应用中应注意权衡; 并不是所有情况下系统都会

发生 Hopf 分岔,当励磁系统参考电压比较大时,系统只发生 SNB 分岔,此时 SNB 分岔点作为系统传输功率极限点,并且采用较高的励磁系统参考电压可以避免系统发生振荡失稳。最后通过时域仿真的方法发现,直流系统对两端交流节点电压的影响并不相同,逆变侧由于受直流系统影响比较大,会出现电压畸变现象。

参考文献

[1] 刘明波,程劲辉,程莹. 交直流并联电力系统动态电压稳定性分析[J]. IEEE Transactoins on Power Delivery, 1998, 13(13): 923-931.

[2] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[3] 庄慧敏. 基于分岔理论的交直流电力系统电压稳定性分析方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

[4] 刘彩霞,周艳平. 分岔理论在电力系统电压稳定性中的应用[J]. 云南水利发电, 2007, 23(3): 87-90.

[5] 彭志炜,胡国根,韩祯祥. 基于分岔理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[6] 刘崇茹,张伯明. 交直流混合输电系统灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 45-49.

[7] 邱革非,束洪春,董俊,等. 联于弱交流系统的 HVDC 输电系统输电能力和电压稳定性的研究[J]. 昆明理工大学学报, 2005, 30(3): 50-55.

[8] 庄慧敏,肖剑. 交直流系统电压稳定性的 Hopf 分岔分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 699-704.

[9] 李康. 基于分岔理论的电力系统动态电压稳定性分析

[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[10] S. L. Richer, R. A. Decarlo. Continuation Methods: Theory and Application [J]. IEEE Transations on Circuits and Systems, 1983, 13(4): 459-463.

[11] 顾伟. 电力系统最优分岔控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.

[12] 樊纪超. 交直流并联输电系统动态安全域及其割集表示[D]. 天津: 天津大学, 2005.

[13] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[14] 谭涛亮,张尧. 交直流互联系统动态电压稳定的分岔值分析[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 49-56.

[15] 李宏仲. 基于 Hopf 分岔理论的电力系统动态电压稳定研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

[16] 赵兴勇,张秀彬,苏小琳. 电力系统电压稳定性研究与分岔理论[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 87-95.

[17] X. Yang, Y. chen, H. L. Shu. Stability Analysis of AC/DC Power Transmission System based on Bifurcation Theories [C]. Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, 2009: 1-7.

作者简介:

高超峰(1989),男,硕士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性;

康积涛(1962),男,教授,研究方向为电力调度自动化、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期: 2013-06-20)

(上接第3页)

[2] 周宏林,杨耕. 大型 DFIG 风电场的 LCC-HVDC 并网及控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 8-12.

[3] 姚伟,迟永宁,程时杰,等. 直流输电技术在海上风电场并网中的应用[J]. 中国电力, 2007, 40(10): 70-74.

[4] 汪宁渤. 甘肃酒泉千万千瓦风电基地面临的挑战与应对措施[J]. 电网与清洁能源, 2009, 30(7): 43-47.

[5] 肖创英,汪宁渤,丁坤,等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-7.

作者简介:

张东明(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统

稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术;

王维庆(1959),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向: 电力系统稳定与控制及风力发电技术;

王海云(1973),女,副教授,硕士研究生导师。研究方向为可再生能源发电与并网技术。

(收稿日期: 2013-09-27)