

多种控制方式下 HVDC 系统的潮流计算

杨彬¹, 叶鹏¹, 孙保功¹, 高校文²

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110178;

2. 辽宁省电力有限公司, 辽宁省 沈阳市 110006)

A Power Flow Calculation Model for HVDC Power Transmission System Under Various Regulation and Control Modes

YANG Bin¹, YE Peng¹, SUN Bao-gong¹, GAO Xiao-wen²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, Liaoning Province, China;

2. Liaoning Electric Power Limited Company, Shenyang 110006, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: In the power flow calculation of AC/DC power grid, it is necessary to be considered that how to effectively describe the conversion of control modes of HVDC power transmission system for the operation and analysis of actual power systems. In this paper, based on the principle of power equivalence and the solution of AC/DC power system by alternative decomposition of AC/DC power system, by use of user-defined modelling environment of power system analysis software package (PSASP) a mathematical model for the power flow calculation of HVDC power transmission system is built, in which the action of main control modes of HVDC power transmission system and the inter-conversion among these main control modes are taken into account. The built model possesses satisfied convergence performance. Calculation results of IEEE 36-bus system show that the built user-defined model can deal with the change of operation mode due to the change of operation conditions, and it can be utilized in power flow calculation of large-scale power grid and simulation study.

KEY WORDS: HVDC power transmission; control mode conversion; power flow calculation; power system analysis software package (PSASP); user-defined modeling

摘要: 在交直流潮流计算中, 如何有效地描述直流输电系统控制方式的转换是实际电力系统运行和分析必须考虑的问题。文中基于功率等值和交直流系统交替解耦求解的原理, 利用电力系统分析综合程序的用户自定义建模环境, 建立了高压直流输电系统潮流计算的数学模型。该模型考虑了直流输电系统主要控制方式的控制作用和相互转换, 具有较好的收敛性。EPRI-36 算例的结果表明, 自定义模型能够处理运行条件改变导致的运行方式发生的转换, 并且有利于大规模电力系统的潮流计算和仿真研究。

关键词: 高压直流输电; 控制方式转换; 潮流计算; 电力系统分析综合程序(PSASP); 自定义建模

0 引言

随着直流输电技术在电力系统中的应用越来越广泛, 现代电网形成了交直流混合输电的局面^[1], 因此交直流电网运行和控制方面的研究就更为迫切。直流输电系统具有更灵活的运行和控制方式^[2], 主要有定功率控制、定电流控制、整流器最小触发角控制或逆变器最小熄弧角控制和定电压控制等。控制方式根据运行条件的不同会发生改变^[3], 同时直流输电系统还配备有载调压变压器分接头控制器等慢速控制设备^[4]。实际运行中, 快速和慢速控制两者有机结合, 保证系统处于最佳运行状态。

由于直流输电系统的稳态运行和控制方式相对复杂, 学者们对控制器的转换条件和转换过程进行了大量研究^[5-6]。文献[7]针对整流器定电流控制、逆变器最小熄弧角控制讨论了整流端电压降低、逆变端电压升高时的控制方式转换问题; 文献[8]研究了3种特定模式的转换问题; 文献[9]研究了整流器的定电流控制、定功率控制和最小触发角控制的转换以及逆变器的最小关断角控制和定电流控制的转换; 文献[10]提出了换流变压器分接头调整的方法, 如何减少控制过程中换流变压器分接头的频繁调整还有待改进。

在 PSASP 的潮流计算程序中, 直流系统数学模型中的直流电流、触发角、关断角均为常数, 不能有效描述直流系统中各种控制方式特性及它们之间的转换过程。本文利用 PSASP 的用户自定义模型功能, 基于功率等值和交直流交替解耦求解的原理, 建立 HVDC 系统的数学模型。该模型考虑了直流输

电系统主要控制方式的控制作用和相互转换。

1 HVDC 系统稳态控制策略及换流器方程

1.1 稳态运行控制方式的转换

从整流侧流向逆变侧的直流电流为^[11]

$$I_d = (U_{dor} \cos \alpha - U_{doi} \cos \beta) / (3X_{Tr} / \pi + R_d + 3X_{Ti} / \pi) \quad (1)$$

式中： r 为整流侧； i 为逆变侧； I_d 为直流线路电流； U_{d0} 为换流变压器空载直流电压； α 为整流器触发滞后角； β 为逆变器触发超前角； X_T 为换流变压器折算到阀侧的漏抗； R_d 为直流线路电阻。

由式(1)可以看出，直流电压和直流电流取决于 α 、 β 、 U_{dor} 和 U_{doi} ，这 4 个量是直流输电系统的控制量。在正常运行时，整流器采用定电流控制方式，当整流侧的交流电压变化时，整流器触发角会发生改变。如果 α 角超出调节范围，换流变压器的分接头切换装置可以调整变压器变比，使 α 角被调节到额定范围内。逆变器通常采用定熄弧角控制方式，也可以采用定电压控制和定 β 角控制方式。当 γ 角超出调节范围时，逆变侧分接头切换装置将 γ 角调节到 $15^\circ \sim 20^\circ$ 。为防止换流变压器分接头频繁调整，当 α 或 γ 超过整定值的 $\pm 2.5^\circ$ 时，对换流变压器分接头进行调节^[12]，使之恢复到额定范围内。

1.2 换流器方程

交直流输电系统接口如图 1 所示。图中： T 为换流变压器变比； U_d 为直流线路电压； \dot{P}_{ac} 和 \dot{Q}_{ac} 是注入交流系统的有功功率和无功功率。

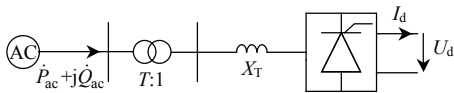


图 1 交直流输电系统接口

Fig. 1 Interface of AC-DC transmission system

直流输电系统换流器的数学模型^[13]为

$$\begin{cases} U_{d0} = 3\sqrt{2}\dot{E}_{ac} / \pi T \\ d_x = 3X_T / \pi \\ U_d = U_{d0} \cos \alpha - d_x I_d \\ \mu = \beta - \arccos(\sqrt{2}I_d X_T T / E + \cos \beta) \\ \gamma = \beta - \mu \\ \dot{P}_{acr} = U_{dr} I_d \\ \dot{Q}_{acr} = \dot{P}_{acr} [\mu_r - \sin \mu_r \cos(2\alpha + \mu_r)] / \sin \mu_r \sin(2\alpha + \mu_r) \\ \dot{P}_{aci} = U_{di} I_d \\ \dot{Q}_{aci} = \dot{P}_{aci} [\mu_i - \sin \mu_i \cos(2\gamma + \mu_i)] / \sin \mu_i \sin(2\gamma + \mu_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中： \dot{E}_{ac} 为换流变压器交流母线电压有效值； γ 为关断角； μ 为换相角。

PSASP 潮流计算程序中直流系统数学模型为

$$\begin{cases} \dot{P}_{ac} = U_d I_d \\ \dot{Q}_{ac} = \dot{P}_{ac} \tan \varphi \\ \cos \varphi \approx U_d / U_{d0} \end{cases} \quad (3)$$

与方程(3)相比，方程(2)的注入功率计算更加准确，对于逆变侧的无功注入功率计算(包括关断角 γ)可以更准确地估计换相失败的发生，为暂态稳定计算提供准确的潮流计算结果。

2 PSASP 用户自定义潮流模型

PSASP 潮流计算程序中，用注入功率作为用户自定义设备的输出量^[14]。等效方法如图 2 所示。

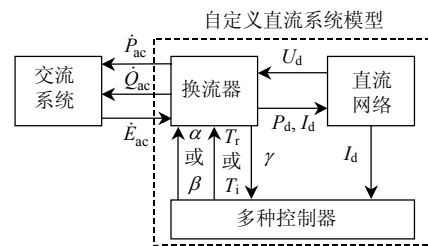


图 2 交直流系统等效方法

Fig. 2 Equivalent method of AC-DC system

在迭代计算过程中，交流系统潮流方程组 and 自定义的直流系统方程组分别单独求解。在求解交流系统变量时，将直流系统的换流器等效为交流节点上的一个等效 PQ 负荷。而在求解直流系统方程组时，将交流系统模拟成加在换流器母线上的一个恒定电压源，相互迭代，直到交直流系统变量都收敛。

将式(2)中的 \dot{P}_{ac} 、 \dot{Q}_{ac} 作为注入交流系统的功率，利用 PSASP 自定义模型功能，在整流侧和逆变侧分别建立换流器模型。其中整流器数学模型框图如图 3 所示。

图中：临时变量 TM9(B1)为整流器触发角 α ，

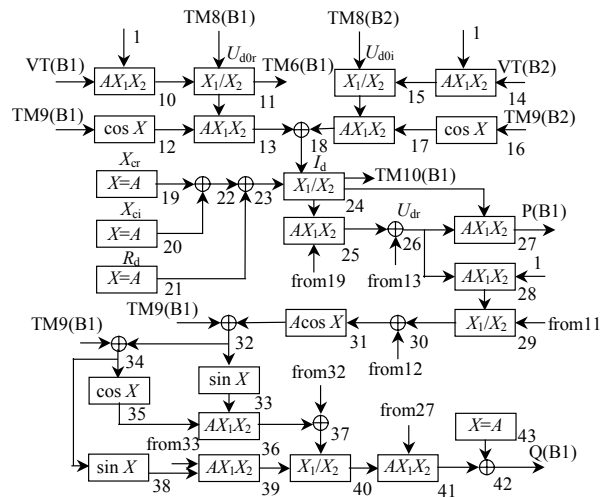


图 3 PSASP 自定义整流器模型

Fig. 3 PSASP user-defined rectifier model

TM9(B2)为逆变器触发角 β ，都是由直流输电系统的控制器得到。26 模块输出为直流电压，24 模块输出为直流电流，32 模块输出为整流侧换相角 μ_r ，43 模块为整流侧补偿电容容量，27 和 42 分别为注入交流系统的有功和无功功率，实现了交直流系统的联接。

为得到较好的收敛性，利用状态变量的稳态迭代误差作为反馈信息，通过比例积分环节来反复校正控制变量取值。稳态运行方式下，整流侧取定电流控制，逆变侧取为定关断角控制。其中定电流控制框图如图 4 所示。

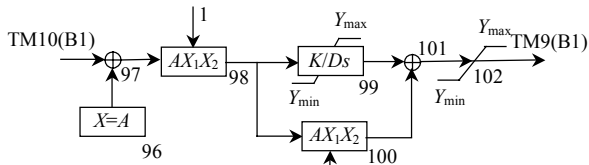


图 4 定电流控制模型

Fig. 4 Model of constant current control

图 4 中：96 模块为整定电流值，TM10(B1)为实际直流电流，定电流控制的输入量是电流整定值与实际电流值的偏差，由这个偏差驱动 PI 调节器。通常 PI 调节器的输出直接作为触发延迟角的指令值 α_{ord} ，定电流控制的输出变量 TM9(B1)为 α_{ord} 的值。逆变侧定关断角控制方式的模型框图如图 5 所示。

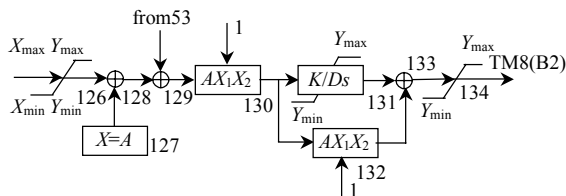


图 5 定关断角控制模型

Fig. 5 Constant extinction angle control model

图 5 中：126 模块为电流偏差控制，当逆变器的换相电抗大于整流器的换相电抗时，可能造成不稳定直流运行点的情况，而采用电流偏差控制后可以避免上述情况发生。129 模块输出为整定关断角与实际关断角的偏差，由这个偏差驱动 PI 调节器。134 模块的输出为逆变器的触发角指令值 β_{ord} ，定关断角控制的输出变量 TM9(B2)为 β_{ord} 的值。

当直流电压和直流电流发生偏移，或运行人员改变直流系统输送功率时，由于定电流控制的作用，整流侧触发角 α 将偏离额定值。当 α 较大时，整流器所消耗的无功功率和直流电压中的谐波分量将显著增大。当 α 过小时，将缩小直流系统的可控范围。因此通常切换整流侧换流变压器分接头来辅助控制 α 角，使它接近于额定值。对于逆变侧，同

样调整换流变压器分接头可以保证关断角或直流电压在额定范围内。文献[15]给出了分接头与触发角 α 和关断角 γ 之间的数学表达式；文献[8]给出了根据触发角调节换流变压器分接头的数学表达式。以整流侧为例，换流变压器分接头调整方法如下：

$$\cos \alpha = \frac{U_{dr} + d_x I_d}{3\sqrt{2}T_r \dot{E}_{acr}/\pi} AM_i \quad (4)$$

$$\Delta M_i = \begin{cases} M_{i,max} - M_i, & M_i > M_{i,max} \\ M_{i,min} - M_i, & M_i < M_{i,min} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta T_r = -\Delta M_i T_r / (M_i + \Delta M_i) \quad (6)$$

$$T_r' = T_r + \Delta T_r \quad (7)$$

整流器运行于定电流控制方式下， α 角满足方程(4)。方程(5)中 $M_{i,max}$ 和 $M_{i,min}$ 分别等于 $\cos \alpha_{min}$ 和 $\cos \alpha_{max}$ ，通过方程(6)(7)的计算，可得出调整后的换流变压器变比 T_r 。图 6 为整流侧换流变压器分接头控制模型框图。

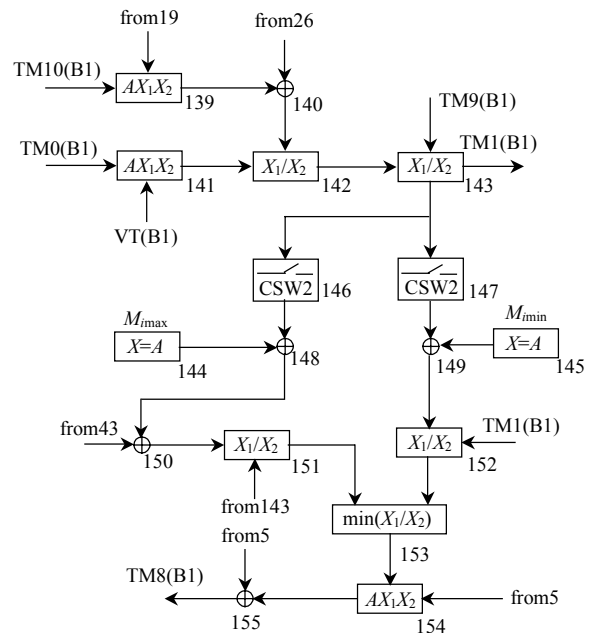


图 6 整流侧换流变压器分接头控制模型

Fig. 6 Rectifier side converter transformer tap control model

图 6 中：146 和 147 模块是判断系统实际的 $\cos \alpha$ 值是否超出额定范围。如果超出范围，输出 M_i ，调整变压器变比；否则输出为 0，使变压器变比保持不变。144 和 145 模块为 $\cos \alpha_{min}$ 和 $\cos \alpha_{max}$ 值，TM10(B1)为电流值，155 模块输出 TM8(B1)为调整后的整流侧换流变压器变比 T_r 。

3 算例分析

EPRI-36 算例系统中，交直流输电系统功率标幺值和电压标幺值为同一基值 $S_B=100$ MVA，

$U_B=220$ kV, 电流、阻抗基准值可以计算得到。触发角 α 额定值 20° , 变化范围 $5^\circ\sim 50^\circ$, γ 角额定值 15° , $\gamma_{\min}=5^\circ$, β 角范围 $15^\circ\sim 60^\circ$, 电流裕度 15%, 直流额定传输功率 300 MW, 额定电流 0.6 kA, 直流电阻为 $R_d=13.2\ \Omega$, 双极运行, 直流系统其它参数见表 1。

表 1 直流输电系统其它参数
Tab. 1 Other parameters of HVDC system

换流器类型	交流母线	换流变抽头级数	换流变漏抗/pu	每极补偿电容容量/pu
整流器	Bus33	11	0.0182	0.5
逆变器	Bus34	22	0.0152	0.5

电流控制器和关断角控制器模型中的积分环节作用是控制迭代误差, 加快潮流计算的收敛速度。整流侧无功注入功率的迭代误差绝对值如图 7 所示。

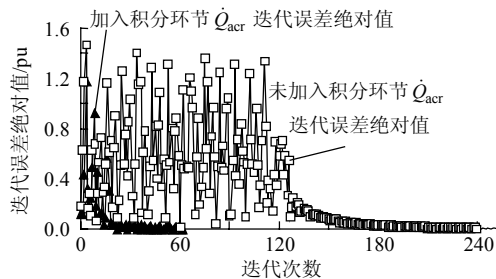


图 7 潮流计算的收敛特性

Fig. 7 Convergence property of power flow algorithm

由图 7 可知, 随着迭代次数增加, \dot{Q}_{acr} 的迭代误差逐渐减小, 最终收敛。但是在未加入积分环节时, 潮流计算程序需进行 237 次迭代计算才能收敛, 加入积分环节后, 迭代 62 次, 潮流计算收敛, 加快了潮流计算的收敛速度。自定义模型与原模型潮流计算结果见表 2。

从 PSASP 自带的直流系统模型与自定义直流系统模型计算结果比较中可以看到, 采用自定义模型的计算结果与原模型计算结果基本一致, 差异是由直流系统消耗无功的计算方法不一致造成的。

在整流侧交流母线 BUS33 处增加负荷并设为 PQ 节点, 调整负荷的有功和无功功率, 使整流器交流母线电压变化范围在 0.99~1.05 pu。整流侧注

表 2 自定义模型与原模型潮流计算结果对比

Tab. 2 Comparison of power flow calculation results and the user-defined model with the original model

参数	自定义模型		原模型	
	整流侧	逆变侧	整流侧	逆变侧
交流母线电压/pu	1.015 7	1.001 5	1.015 5	1.001 1
直流电压/pu	1.127 4	1.091 4	1.136 9	1.100 6
注入交流系统有功功率/pu	-3.000 2	2.905 8	-3.001 5	2.905 7
注入交流系统无功功率/pu	-0.416 2	-0.104 8	-0.426 2	-0.117 4

入交流系统功率如图 8 所示, 对于整流器交流母线节点来说功率方向为发出, 所以有功和无功注入功率均为负值。

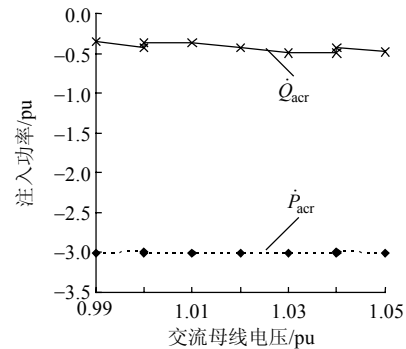


图 8 整流侧注入交流系统的有功和无无功功率

Fig. 8 Injection power of rectifier side AC system

当整流器交流母线电压变化时, 由于多种控制方式的调节作用, 整流变压器变比和换流器的触发角变化情况如图 9~10 所示。

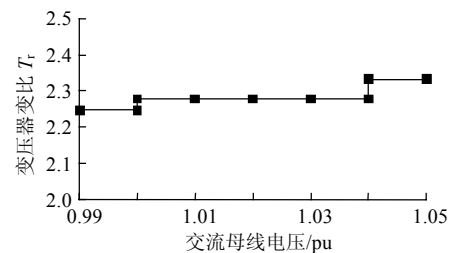


图 9 换流变压器变比的变化情况

Fig. 9 Changes of rectifier transformer ratio

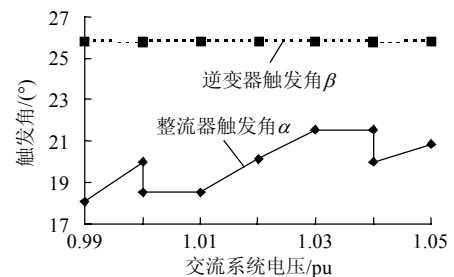


图 10 整流侧触发角 α 与逆变器触发角 β 变化情况

Fig. 10 Changes of rectifier side trigger angle α and inverter side trigger angle β

从图 8~10 可看出, 整流侧交流母线电压变化时, 由于逆变侧交流电压变化很小及在定电流控制器的作用下, 使得直流电流和电压基本不变, 因此注入交流系统的有功功率是基本不变的。整流侧触发角 α 在调节器的作用下随电压的升高而增大。在 α 角较小时, 直流系统从交流系统中吸收的无功功率较少。触发角 α 增大后, 直流系统从交流系统中吸收更多的无功功率。由于逆变侧交流母线电压和关断角 γ 变化很小, 所以逆变侧触发角 β 基本不变。自定义模型符合高压直流输电系统的特性。

当交流电压下降至 1 pu 时, 触发角 α 调节超出了下限范围 17.5°, 为增大 α 可以通过减小整流变压器变比 T_r 来实现, 变比 T_r 的值从 2.278 06 调节到 2.244 27。 T_r 的减小使 α 角调节到其额定值 20°左右, 触发角 α 的增大使直流系统从交流系统中吸收了更多的无功功率。当交流母线电压上升至 1.04 pu 时, α 调节超出了上限范围 22.5°, 为减小 α , 可通过增加整流变压器变比 T_r 来实现, 变比 T_r 从 2.278 06 调节至 2.333 97, 使触发角 α 的值被调节到其额定值 20°左右, 触发角 α 的减小, 降低了直流系统从交流系统中吸收的无功功率。这证明了当触发角调节超出稳态调节范围时, 换流变压器分接头控制器的自定义模型可以对换流变压器变比进行调节, 可将触发角调节到额定值附近, 增加了直流系统的调节范围。根据实际直流输电工程, α 和 γ 的稳态调节范围为 $\pm 2.5^\circ$, 可有效避免调节过程中换流变压器分接头的频繁调整。

4 结论

1) PSASP 自定义直流系统模型采用相对精确的计算表达式, 更加详细地计算了无功功率。

2) 该模型可以考虑运行条件变化时, 直流输电系统稳态运行方式的转换, 综合并协调了多种控制作用, 具有工程实用价值。

3) 自定义模型能够反映高压直流输电系统的工作特性。在控制器模型中加入积分环节可以控制迭代误差, 加快潮流计算的收敛速度。

4) 如何在该模型中综合更多的直流输电控制方式和它们之间的相互转换, 是下一步还需继续深入研究的问题。

参考文献

- [1] 郑美特. 全国联网和大区形成主干网架的研究[J]. 电网技术, 1999, 23(1): 63-66.
Zheng Meite. Research on nationwide integrated power system and regional trunk network planning[J]. Power System Technology, 1999, 23(1): 63-66(in Chinese).
- [2] 叶廷路. 葛南直流输电系统的运行与控制[J]. 电网技术, 1994, 18(1): 20-25.
Ye Tinglu. The operation and control of Ge-Nan HVDC Transmission System[J]. Power System Technology, 1994, 18(1): 20-25(in Chinese).
- [3] Thukaram D, Jenkins L, Visakha K. Optimum allocation of reactive power for voltage stability improvement in AC-DC power systems [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2): 237-246.
- [4] 杜治. 龙一政高压直流输电分接头控制[J]. 湖北电力, 2003, 27(增刊): 59-60.
Du Zhi. The tap changer control system[J]. Hubei Electric Power, 2003, 27(Supplement): 59-60(in Chinese).
- [5] 许文浩, 廖志伟, 黄少先, 等. 基于混合 Petri 网的 HVDC 控制系统模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3187-3191.
Xu Wenhao, Liao Zhiwei, Huang Shaoxian, et al. Model of HVDC control system based on hybrid Petri net[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3187-3191(in Chinese).
- [6] Singh B, Singh B N, Chandra A, et al. A review of three-phase improved power quality AC-DC converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 641-660.
- [7] 周双喜, 吕佳丽, 张元鹏. 直流输电对电压稳定性的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(3): 4-7.
Zhou Shuangxi, Lü Jiali, Zhang Yuanpeng. Influence of HVDC on voltage stability[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1999, 39(3): 4-7(in Chinese).
- [8] 吴红斌, 丁明, 李生虎. 直流输电模型和调节方式对暂态稳定影响的统计研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 32-37.
Wu Hongbin, Ding Ming, Li Shenghu. Statistical research on the effects of HVDC models and controls to transient stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 32-37(in Chinese).
- [9] 刘崇茹, 张伯明. 交直流输电系统潮流计算中换流器运行方式的转换策略[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 17-21.
Liu Chongru, Zhang Boming. Transformation strategy for operation mode of converter in power flow calculation of AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 17-21(in Chinese).
- [10] 刘崇茹, 张伯明, 孙宏斌. 交直流系统潮流计算中换流变压器分接头的调整方法[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 22-26.
Liu Chongru, Zhang Boming, Sun Hongbin. A method of adjusting tap of converter transformer for load flow calculation of AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 22-26(in Chinese).
- [11] 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: 36-37.
- [12] 殷威扬, 文俊, 刘洪涛, 等. 葛一南直流输电工程无功及电压控制的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 62-66.
Yin Weiyang, Wen Jun, Liu Hongtao, et al. Research on the control of reactive power & AC voltage in Ge-Nan HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 62-66(in Chinese).
- [13] 邵震霞, 李兴源. 高压直流输电系统控制器数字仿真实现方法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2002, 34(2): 80-83.
Shao Zhenxia, Li Xingyuan. Method of implementing digital simulation for HVDC controller[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2002, 34(2): 80-83(in Chinese).
- [14] 武守远, 周孝信, 赵贺, 等. 电力系统新型设备的一种用户自定义建模方法[J]. 电网技术, 1997, 21(6): 1-4.
Wu Shouyuan, Zhou Xiaoxin, Zhao He, et al. User-defined modeling for new control equipment in power system[J]. Power System Technology, 1997, 21(6): 1-4(in Chinese).
- [15] 张跃锋, 颜伟, 朱蕾蕾, 等. 交直流混合输电系统的换流变压器分接头控制[J]. 中国电力, 2008, 41(4): 20-24.
Zhang Yuefeng, Yan Wei, Zhu Leilei, et al. Tap change control of converter transformers for hybrid AC/DC power transmission systems[J]. Electric Power, 2008, 41(4): 20-24(in Chinese).



杨彬

收稿日期: 2009-09-19.

作者简介:

杨彬(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电技术, E-mail: _xiao_fei_xia_@163.com;

叶鹏(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统分析与控制的科研和教学工作。

(责任编辑 王晔)