

一种用于交直流电力系统稳定分析的全状态直流模型

屠竞哲

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对交直流电力系统的稳定性研究中缺乏一种标准的直流模型以及存在不同详细程度的直流模型的问题,基于文献中常见的 EPRI 直流模型以及电力系统仿真软件 PSS/E 的 CDC4 直流模型,提出了一种包含 7 个不同运行状态的全状态直流模型,并用 Matlab 程序和 PSS/E 软件分别对单机无穷交直流系统算例进行了不同故障情况的动态仿真,从而验证了全状态直流模型的正确性。研究结果表明,这种全状态直流模型既具有良好的控制系统,又包含完整的运行状态,很好地满足了要求。

关键词:交直流;直流模型;全状态

中图分类号:TM7

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)08-0077-04

A full-state DC model for stability analysis of AC-DC power systems

TU Jing-zhe

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of lacking a standard DC model and existing different detail-level DC models in stability analysis of AC-DC power systems, based on the EPRI DC model common in the literature and the CDC4 DC model contained in the power system simulating software PSS/E, a full-state DC model that contains 7 different operating states was recommended, the dynamic simulations of the single machine-infinite bus testing system under different contingencies was made through Matlab program and PSS/E software respectively, therefore the full-state DC model was validated. The results indicate that the full-state DC model has both good control systems and complete operating states, which can well satisfy the requirements.

Key words: AC-DC; DC model; full-state

0 引言

交直流电力系统稳定性研究日益重要,其中很关键的一点就是直流系统的建模。由于直流系统换流装置的不同以及直流控制系统的差异,至今没有一个标准的直流模型。另外基于研究对象和研究重点的不同,直流模型的详细程度也有所区别^[1-2]。

直流系统的计算模型常见的有以下 3 种:简单模型、响应模型以及详细模型^[3]。简单模型只把直流系统模拟成恒定的功率注入或者静态的换流器方程,交直流量之间的联系与潮流计算类似,一般适用于直流

对整个系统稳定影响较小的情况;响应模型的性能介于简单模型和详细模型之间,一般忽略直流线路和极控制的动态,但是包含直流控制系统模式转换和低压限流环节(VDCL),还模拟了直流系统闭锁、旁通以及恢复等动态过程,是暂态稳定和中长期稳定计算最常用的模型;详细模型能够完全描述系统的电磁暂态过程,可以准确模拟直流线路和直流控制系统的动态行为,但其计算量很大,难以用于机电暂态研究。

因此在交直流系统的稳定研究中,需要选择一种合适的直流模型^[4]。基于文献中常见的 EPRI 直流模型以及电力系统分析软件 PSS/E 中的 CDC4 直流模型,本研究提出一种包含 7 个不同运行状态的全状态

直流模型,并用 Matlab 程序和 PSS/E 软件分别对单机无穷交直流系统算例进行不同故障情况的动态仿真,从而验证全状态直流模型的正确性。

1 典型的直流模型

1.1 EPRI 直流模型

下面介绍一个文献上常见的 2 状态 2 阶响应模型,称作 EPRI 模型^[5-7]。整流侧电流控制框图如图 1 所示,逆变侧类电流控制模型是类似的。

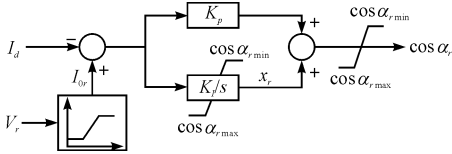


图 1 电流控制器模型

根据上述模型,直流系统可以运行在整流侧定电流控制或者逆变侧定电流控制两种状态:

(1) 整流侧控制:

$$\begin{cases} \dot{x}_{dc} = K_p [I_{VDCLr}(V_{dr}) - I_d] \\ \cos \alpha = \text{sat} \{ x_{dc} + K_p [I_{VDCLr}(V_{dr}) - I_d] \} \\ \dot{I}_d = \frac{1}{L_d} (V_{dr} - V_{di}) - \frac{R_d}{L_d} I_d \\ \gamma = \gamma_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 逆变侧控制:

$$\begin{cases} \dot{x}_{dc} = K_p [I_d - I_{VDCLi}(V_{di})] \\ \cos \gamma = \text{sat} \{ x_{dc} + K_p [I_d - I_{VDCLi}(V_{di})] \} \\ \dot{I}_d = \frac{1}{L_d} (V_{dr} - V_{di}) - \frac{R_d}{L_d} I_d \\ \alpha = \alpha_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

EPRI 模型给出了电流控制方程,但它没有描述直流系统闭锁、旁通、恢复等运行状态,因此其适用范围有一定限制。

1.2 CDC4 直流模型

电力系统计算软件 PSS/E 中最常用的直流模型 CDC4 是比较完整的准稳态模型^[8],其系统框图如图 2 所示。

若整流侧交流电压 E_r 低于闭锁电压,直流系统双侧闭锁,此间直流系统有功无功都等于零。当 E_r 恢复后,系统电压和电流按给定的速率重新启动。直流系统重新启动期间,恢复策略同 VDCL 需要协调。

若逆变器直流电压 V_{di} 低于旁通电压,逆变器旁通,整流器继续运行。此间整流侧继续发送有功无功,逆变器直流侧短路,逆变器交流侧开路。当 V_{di} 恢复

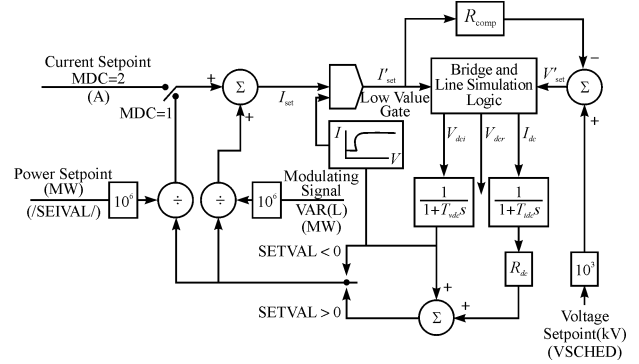


图 2 电力系统计算软件 PSS/E 中最常用的 CDC4 直流模型

后,逆变器重新启动。同整流侧一样, V_{di} 的恢复情况由给定恢复限制速度和 VDCL 共同确定。

CDC4 模型不仅可以模拟常见的整流侧控制、逆变侧控制以及触发角/关断角控制 3 种正常运行状态,还可以模拟闭锁、旁通、闭锁恢复以及旁通恢复 4 种非正常状态,几乎涵盖了所有实际中的直流运行状态,然而从 CDC4 模型的原理框图无法准确地推测出直流系统的控制方程。

2 全状态直流模型

由于以上两种直流模型各自具有明显的优缺点,因此结合 EPRI 模型的电流控制方程以及 CDC4 模型所包含的闭锁、旁通以及恢复等运行状态,本研究提出了以下包含 7 个状态的直流模型,称之为全状态直流模型。

(1) 整流侧功率控制:

$$\begin{cases} \dot{x} = K_p (I_{ord} - I_d) \\ U_r \geq V_{BLOCK} \\ V_{di} \geq V_{BYPAS} \\ \alpha \geq \alpha_{\min} \end{cases}, \begin{cases} \cos \alpha = \text{sat} [x + K_p (I_{ord} - I_d)] \\ I_{ord} = \min [P_{ord}/V_{dr}, I_{VDCL}(V_{dr})] \\ \gamma = \gamma_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

(2) 逆变侧功率控制:

$$\begin{cases} \dot{x} = K_p (I_d - I_{ord}) \\ U_r \geq V_{BLOCK} \\ V_{di} \geq V_{BYPAS} \\ \gamma \geq \gamma_{\min} \end{cases}, \begin{cases} \cos \gamma = \text{sat} [x + K_p (I_d - I_{ord})] \\ I_{ord} = \min [P_{ord}/V_{dr} \cdot 0.9, I_{VDCL}(V_{di})] \\ \alpha = \alpha_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

(3) 触发角/关断角控制:

$$\begin{cases} U_r \geq V_{BLOCK} \\ V_{di} \geq V_{BYPAS} \\ \alpha < \alpha_{\min} \\ \gamma < \gamma_{\min} \end{cases}, \begin{cases} \dot{x} = K_p (I_{ord} - I_d) \\ I_{ord} = I_d \\ \alpha = \alpha_{\min} \\ \gamma = \gamma_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

(4) 闭锁:

$$U_r < V_{BLOCK}, I_d = 0 \quad (6)$$

(5) 闭锁恢复:

$$\begin{cases} V_{dr} \geq V_{RSVOL} \\ I_d \geq I_{RSCUR} \\ U_r \geq V_{UNBLOCK} \end{cases}, \begin{cases} \dot{x} = K_p(I_{ord} - I_d) \\ \cos \alpha = \text{sat}[x + K_p(I_{ord} - I_d)] \\ I_{ord} = \min[I_{ramp}(t), I_{VDCL}(V_{dr})] \\ V_{di} = V_{ramp}(t) \end{cases} \quad (7)$$

(6) 旁通:

$$\begin{cases} U_r \geq V_{BLOCK} \\ V_{di} < V_{BYPAS} \end{cases}, \begin{cases} \dot{x} = K_p(I_{ord} - I_d) \\ \cos \alpha = \text{sat}[x + K_p(I_{ord} - I_d)] \\ I_{ord} = \min[P_{ord}/V_{dr}, I_{VDCL}(V_{dr})] \\ V_{di} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

(7) 旁通恢复:

$$\begin{cases} V_{di} \geq V_{RSVOL} \\ I_d \geq I_{RSCUR} \\ V_{di} \geq V_{UNBYPAS} \end{cases}, \begin{cases} \dot{x} = K_p(I_{ord} - I_d) \\ \cos \alpha = \text{sat}[x + K_p(I_{ord} - I_d)] \\ I_{ord} = \min[P_{ord}/V_{dr}, I_{VDCL}(V_{dr})] \\ V_{di} = V_{ramp}(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中 U_r —整流侧交流母线电压; V_{dr} —整流侧直流电压; V_{di} —逆变侧直流电压; α —触发滞后角; γ —越前关断角; α_{\min} —最小触发滞后角; γ_{\min} —最小越前关断角; P_{ord} —直流功率设定值; K_p —控制器常数; I_{ord} —直流电流设定值; I_d —直流电流; I_{VDCL} —VDCL 电流函数; I_{ramp} —电流恢复函数; V_{ramp} —电压恢复函数; V_{BLOCK} —闭锁电压; V_{BYPAS} —旁通电压; $V_{UNBLOCK}$ —闭锁恢复电压; $V_{UNBYPAS}$ —旁通恢复电压; V_{RSVOL} —最小恢复电压; I_{RSCUR} —最小恢复电流。

全状态直流模型既具有 EPRI 模型良好的控制系统, 又包含 CDC4 模型完整的运行状态, 兼具两种典型直流模型的优点, 同时弥补了它们各自的不足之处, 可有效地应用于交直流电力系统稳定分析。

3 模型验证

用于模型验证的算例系统是基于全状态直流模型的单机无穷交直流系统, 简单而具有代表性, 系统结构图如图 3 所示。

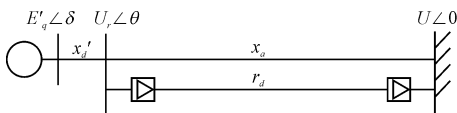


图 3 单机无穷交直流全状态系统

为了简化分析, 本研究忽略了发电机的升压变压器部分, 把变压器的等值电抗合并到发电机内部电抗中, 而电压采用标么值。

系统的基本参数(标么值)为:

$$\begin{aligned} P_m &= 2; M = 13; D = 0; x'_d = 0.1; \\ x_a &= 0.1; r_d = 0.375; R_{cr} = 0.15; R_{ci} = 0.15; \\ \alpha_{\min} &= 0.175; \gamma_{\min} = 0.384; P_{ord} = 1; K_p = 20; \\ V_{BLOCK} &= 0.6; V_{BYPAS} = 0.6; V_{UNBLOCK} = 0; \\ V_{UNBYPAS} &= 0; V_{RSVOL} = 0; I_{RSCUR} = 0. \end{aligned}$$

式中 M —发电机转动惯量; D —发电机阻尼系数; P_m —发电机机械功率; x'_d —发电机暂态电抗; x_a —交流线路电抗; r_d —直流线路电阻; R_{cr} —整流侧换相电抗; R_{ci} —逆变侧换相电抗; 其他的变量和参数同第 2 节说明。

算例用 Matlab 程序对基于全状态直流模型的单机无穷交直流系统进行仿真(细实线), 同时用 PSS/E 软件对基于 CDC4 模型的单机无穷交直流系统进行仿真(粗实线)。

本研究分别对单机无穷交直流系统的整流端交流母线以及逆变端交流母线施加三相短路故障, 同时分别经过 0.02 s、0.05 s、0.1 s 时间切除。

不同故障情况下, 基于上述两种直流模型的单机无穷交直流系统的机端电压响应曲线如图 4 ~ 图 9 所示。

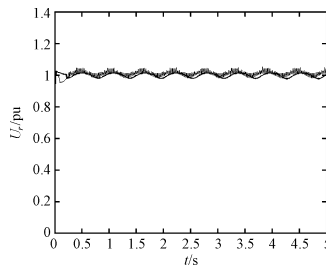


图 4 整流侧短路 0.02 s 切除时的机端电压曲线

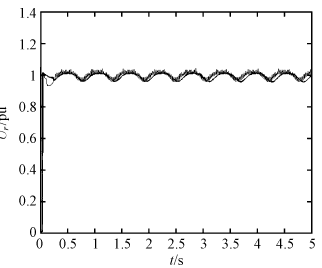


图 5 整流侧短路 0.05 s 切除时的机端电压曲线

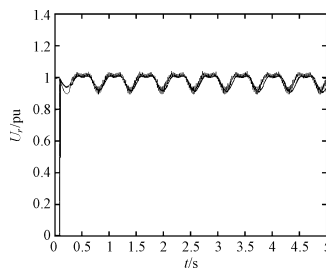


图 6 整流侧短路 0.1 s 切除时的机端电压曲线

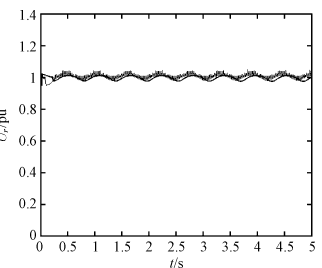


图 7 逆变侧短路 0.02 s 切除时的机端电压曲线

CDC4 模型是商业软件 PSS/E 自带的直流模型, 因此可以作为参考依据, 只需将全状态直流模型的响应曲线与之比较就可以进行模型验证。

全状态直流模型的特点在于包含闭锁、旁通以及恢复等运行状态, 因此对其整流侧和逆变侧分别施加

短路故障可以包括这些动态过程,使得模型验证更加具有可靠性。

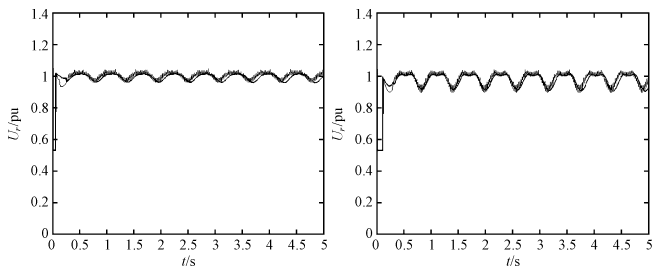


图 8 逆变侧短路 0.05 s 切除时的机端电压曲线
图 9 逆变侧短路 0.1 s 切除时的机端电压曲线

由不同故障地点以及不同切除时间情况下两种模型的响应曲线比较,可以看出基于全状态直流模型系统的机端电压曲线和基于 CDC4 直流模型系统的机端电压曲线几乎一致,因此验证了所提出的全状态直流模型的正确性。

4 结束语

基于文献中常见的 EPRI 直流模型以及电力系统分析软件 PSS/E 中的 CDC4 直流模型,本研究提出了一种包含 7 个状态的全状态直流模型,并通过仿真进行了模型验证。这种全状态直流模型既具有良好的控制系统,又包含完整的运行状态,很好地满足了交直流系统稳定分析的要求。

参考文献(References):

- [1] ARABI S, KUNDUR P, SAWADA J H. Appropriate HVDC transmission simulation models for various power system stability studies[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1998, 13(4):1292 - 1297.
- [2] JOHNSON B K. HVDC models used in stability studies[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1989, 4(2):1153 - 1163.
- [3] MAO Xiao-ming, ZHANG Yao, YE Feng, et al. Selection of HVDC models for stability studies[C]//3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008:1933 - 1937.
- [4] IEEE COMMITTEE. Functional model of two-terminal HVDC systems for transient and steady-state stability[J]. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1984, 103(6):1249 - 1255.
- [5] ARRILLAGA J. High Voltage Direct Current Transmission[M]. London: Peter Peregrinus, 1983.
- [6] DEMARCO C L, CANIZARES C A. A vector energy function approach for security analysis of AC-DC systems[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1992, 7(3):1001 - 1011.
- [7] CANIZARES C A, ALVARADO F L, DEMARCO C L, et al. Point of collapse methods applied to AC-DC power systems[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1992, 7(2):673 - 683.
- [8] 黄莹,徐政,贺辉. 电力系统仿真软件 PSS/E 的直流系统模型及其仿真研究[J]. **电网技术**, 2004, 28(5):25 - 29. [编辑:张翔]

(上接第 68 页)

传感器出现故障后的信息替换及系统工作模式的转换,积累了传感器容错技术的经验。仿真结果表明,通过所设计的传感器替代容错和飞行模态转换容错方法,能够有效地检测出传感器故障并进行容错处理,使得无人直升机能够正常飞行。

参考文献(References):

- [1] LOEGERING G, HARRIS S. Landing dispersion results-global hawk auto-land system[J]. **AIAA**, 2006, 22(4):20 - 23.
- [2] 杨伟,章卫国,刘小雄. 容错飞行控制系统[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007:83 - 117.
- [3] 秦永元,牛惠芳. 系统故障检测理论在容错组合导航设计中的应用[J]. **西北工业大学学报**, 1998, 16(3):396 - 400.
- [4] 余德义. 飞行控制系统实物在回路中的仿真[J]. **南京航空航天大学学报**, 1995, 27(2):281 - 283.
- [5] 陈娜. 多传感器系统的仿真模型研究[J]. **无线电工程**, 1997, 27(4):58 - 61.
- [6] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断和容错控制[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [7] 徐章遂,房立清,王希武,等. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [8] 袁锁中. 数字式无人直升机飞行控制系统研制[J]. **计算机测量与控制**, 2003, 11(1):5 - 10.
- [9] LIU Yong, GALATI D, MANVAN A S. Nash Strategies with Distance Discount Factor in Target Selection Problems[C]//Proceeding of the 2004 American Control Conference. Boston: [s. n.], 2004:130 - 135.
- [10] NIKOLOS I K, VALAVANIS K P, SOURVELOUDIS T N C, et al. Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation[J]. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics**, 2003, 12(5):200 - 207.
- [11] WANG Sheng-wen, HONG Bin-rong. Fault injection system for automatic testing system[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2003, 10(3):321 - 324. [编辑:张翔]