交直流系统暂态仿真中换流器的改进准稳态模型

吴红斌[1], 丁明[1], 黄凯[2], 李生虎[1]

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 南京自动化研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 当交流系统发生三相不对称故障时, 忽略直流系统负序分量的准稳态模型将给交直流混合系统的仿真带来较大的误差。文中考虑了整流器、逆变器的具体差异, 给出了换相电压不对称情况下的直流电压计算方法, 编制了换流器的仿真程序, 并应用到考虑直流系统负序分量的换流器改进准稳态模型的混合系统暂态计算中, 取得了令人满意的结果。

关键词: 交直流系统; 整流器; 逆变器; 改进准稳态模型; 暂态仿真

中图分类号: TM 712 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2003)10-0037-04

1 引言

在交直流混合系统的暂态稳定仿真中, 换流器的模型一直是个难点。现有的换流器模型中, 变拓扑结构的模型由于需小步长而导致计算时间过长, 在实际应用中难以接受; 准稳态模型是工程上常用的模型, 但其只考虑了直流节点换相电压的正序分量, 当交流系统不对称故障时将产生较大的误差。为此, 国内的学者提出了考虑直流系统负序分量的准稳态模型[1]。

本文正是在此基础上进一步考虑了整流器和逆变器实际运行中的具体差异, 并将该模型运用于交直流混合系统的暂态仿真中, 结合 EPRI-36 节点系统, 给出了详细的算例结果, 验证了本算法的有效性。

2 数学模型

直流系统的接线图如图 1 所示。

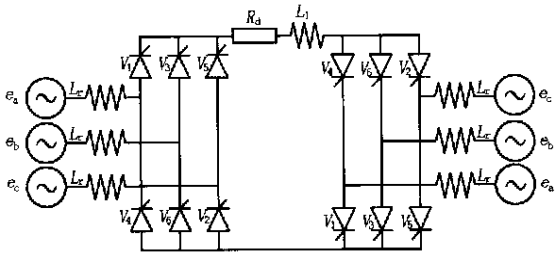

图 1 直流系统接线图

Fig. 1 HVDC system connections

交直流系统模型仿真, 是基于以下的前提进行的:

1) 换流器由理想的桥阀组成;
2) 不计换流变压器的电阻和激磁导纳;
3) 不计高次谐波电压、电流分量;
4) 平波电抗极大, 直流电压、电流无波纹;
5) 采用等间隔触发装置。

以下将详细推导换流器直流电压、换相重叠角的计算。

2.1 整流器

交流端电压波形由下式描述:

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}\, E_{AV} \sin(w\,t + \theta_{AV}) \\ e_b = \sqrt{2}\, E_{BV} \sin(w\,t + \theta_{BV}) \\ e_c = \sqrt{2}\, E_{CV} \sin(w\,t + \theta_{CV}) \end{cases} \tag{1}$$

则正常时整流器侧的电压波形如图 2 所示, 由该图可知:

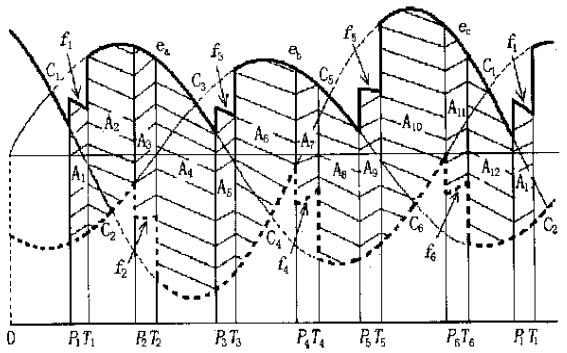

图 2 整流器侧电压波形图

Fig. 2 Voltage wave of rectifier

$$\begin{cases} P_1 = C_1 + \alpha_1 \\ P_i = P_{i-1} + \dfrac{\pi}{3} \ (i = 2, \cdots 6) \\ \alpha_i = P_i - C_i \ (i = 2, \cdots 6) \end{cases} \tag{2}$$

$$T_i = P_i + \mu_i \ (i = 1, 2 \cdots 6) \tag{3}$$

基金项目: 国家自然科学基金(59977004)、安徽省自然科学基金(0010442)和教育部博士点基金资助

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中: P_i 为触发脉冲发出时刻; α_i 为触发滞后角; C_i 为换相电压过零点; μ_i 为阀的换相角。

2.1.1 过零点的计算

换相电压过零点由下式计算:

$$\begin{cases} C_{1,4}=\arctan\dfrac{E_{AV}\sin\theta_{AV}-E_{CV}\sin\theta_{CV}}{E_{CV}\cos\theta_{CV}-E_{AV}\cos\theta_{AV}} \\ C_{2,5}=\arctan\dfrac{E_{CV}\sin\theta_{CV}-E_{BV}\sin\theta_{BV}}{E_{BV}\cos\theta_{BV}-E_{CV}\cos\theta_{CV}} \\ C_{3,6}=\arctan\dfrac{E_{BV}\sin\theta_{BV}-E_{AV}\sin\theta_{AV}}{E_{AV}\cos\theta_{AV}-E_{BV}\cos\theta_{BV}} \end{cases} \tag{4}$$

式中: $C_{1,4}$ 为 C_1 和 C_4, 两者相差 π 弧度; $C_{2,4}$、$C_{3,6}$ 类同。需注意, 当换相电压出现同幅值、相角互为相反数时上式不再适用, 容易推出出现这种情况时过零点一般为 90 及其整数倍[2]。

2.1.2 各阀换相角计算

以阀 1 为例[2]:

$$\frac{\sqrt{2}E}{2X_\gamma}[\cos\alpha-\cos(\alpha+\mu)]=I_d$$

$$\Rightarrow\mu=\arccos\left(\cos\alpha-\frac{\sqrt{2}X_\gamma I_d}{E}\right)-\alpha \tag{5}$$

其中: E 为换相线电压; X_r 为每相换相电抗

则在等间隔触发脉冲条件下:

$$\begin{cases} \mu_4=\mu_1=\arccos\left[\cos\alpha_1-\dfrac{\sqrt{2}X_\gamma}{E_{AC}}I_d\right]-\alpha_1 \\ \mu_5=\mu_2=\arccos\left[\cos\alpha_2-\dfrac{\sqrt{2}X_\gamma}{E_{BC}}I_d\right]-\alpha_2 \\ \mu_6=\mu_3=\arccos\left[\cos\alpha_3-\dfrac{\sqrt{2}X_\gamma}{E_{AB}}I_d\right]-\alpha_3 \end{cases} \tag{6}$$

2.1.3 直流电压计算

如图 2 所示, 计算得到的直流电压为:

$$V_d=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}(V_m-V_n)\,d(wt)=\frac{1}{2\pi}\sum_{i=1}^{12}A_i \tag{7}$$

当有相控, 且有负载的情况下, 由于 V_5 和 V_1 换相, 换流器交流端 CA 两相短路, 线电压 e_{ca} 全部降落在这两相的换相电抗 $2X_r$ 上, 每相 X_r 的降落电压为 e_{ca} 的一半[3], 故:

$$f_1(E_i, I_d, X_\gamma)=\frac{1}{2}(\mathring{e}_c+\mathring{e}_a) \tag{8}$$

$$\begin{aligned} A_1=&\int_{P1}^{T1}(f_1-\mathring{e}_b)\,d(wt)= \\ &\sqrt{2}E_{BV}[\cos(P_1+\theta_{BV})-\cos(T_1+\theta_{BV})]+ \\ &\frac{\sqrt{2}}{2}\{E_{AV}[\cos(P_1+\theta_{AV})-\cos(T_1+\theta_{AV})]+ \\ &E_{CV}[\cos(P_1+\theta_{CV})-\cos(T_1+\theta_{CV})]\} \end{aligned} \tag{9}$$

以此类推, 可以求出 $A_2\sim A_{12}$。当换相电压不对称时, 图 2 的波形将会发生各种畸变, 上述计算公式不再完全适用, 具体计算在相关文献[3]中有详细讨论。

2.2 逆变器

逆变器和整流器的波形有很大差异, 但在求解直流等效电压时原理并无差别。逆变器的其它部分如: 过零点、各阀换相角计算均与整流器相同, 这在相关文献[4]中也有详细讨论, 在此不再列举。

3 直流线路的调节方式和紧急控制措施

直流线路所采取的调节方式[5]为定电流- 定熄弧角、定电流- 定电压、定延迟角- 减额定电流的混合调节方式, 整流侧按照定电流调节, 逆变侧则按照线路末端电压保持一定的方式进行调节。

此外, 对于直流系统, 还有两种紧急控制措施[6]: 低电压限电流和直流线路的重启动。

低电压限电流(图 3)是直流输电系统中的常用措施, 其中 D_v 为低电压限值, 当电压过低时适当减小电流的整定值。

直流线路重起动特性见图 4。k_i 表示直流线路起动 T_i 时刻后, 直流线电流整定系数。k_j 表示直流线路起动 T_j 时刻后, 直流线电流整定系数。当计算中发现直流线路不能正常运行时, 直流线路停运一周波后按起动特性重起动, 当发生换相失败、3- 4 运行方式时将触发角提前一定角度触发, 如直流线仍不能正常运行则将直流线按起动特性重起动。

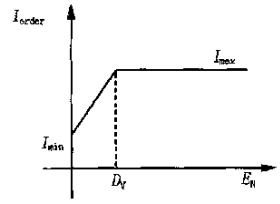

图 3 低电压限电流

Fig. 3 VDCOL

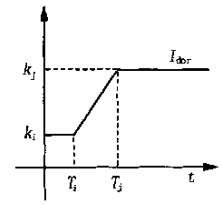

图 4 直流线重启动

Fig. 4 Recovery of DC

4 计及负序分量的换流器改进准稳态模型程序流程

设直流系统的接线图如图 5 所示。

在改进的准稳态模型中, 正序部分的计算方法与准稳态模型时一致。在此, 本文主要讲述关于负序分量的计算部分即改进的部分。一般地, 换流变换器靠近直流系统的一侧为 Y 或 Δ 接线方式, 故零序分量一般为 0。以 MN 侧为例, 其程序流程为:

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 5　直流系统的接线图

Fig. 5　HVDC system connection

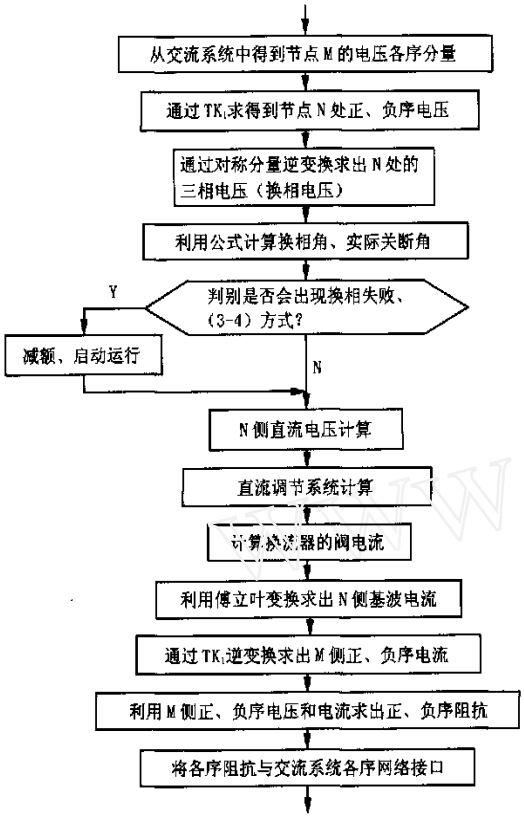

图 6　改进准稳态模型程序流程框图

Fig. 6　Flow chart of modified QSS

5　算例分析

5.1　计算条件

该例系统采用文献[5]所示的修改后的 EPRI - 36 节点系统, 如图 7 所示。直流系统参数取自文献[4], 稳定数据取自文献[7], 仿真时间为 2.0 s。

5.2　准稳态模型和改进准稳态模型的比较

下面分别对交流系统发生对称故障和不对称故障时直流线路中有关量的计算结果进行分析。

(1) 对称性故障

图 8 表示故障点选为远离直流线的线路节点 3—5 发生三相短路时, 采用准稳态模型和改进的准稳态模型的仿真结果。故障点离节点 3 的距离为 16%, 故障开始时间为 0.03 s; 3 节点处保护动作时间为 0.09 s, 重合闸时间为 0.63 s; 5 节点处保护动作时间为 0.10 s, 重合闸时间为 0.68 s。

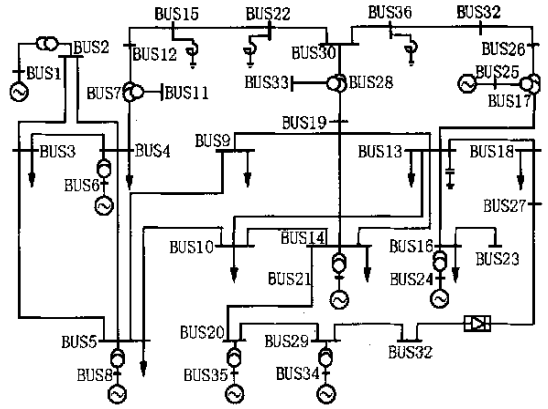

图 7　系统接线图

Fig. 7　System connection

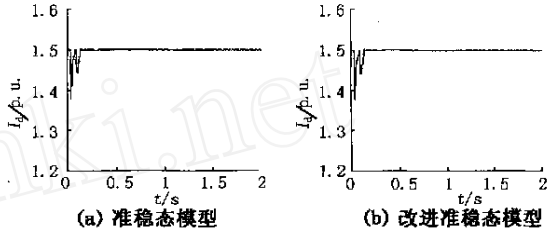

图 8　对称性故障时不同模型的结果

Fig. 8　Results of symmetrical fault

(2) 不对称故障

图 9 表示故障点选为远离直流线的线路节点 3—5 发生 A 相单相接地短路时, 采用准稳态模型和改进的准稳态模型的仿真结果。故障时间、地点以及继电保护动作时间同上。

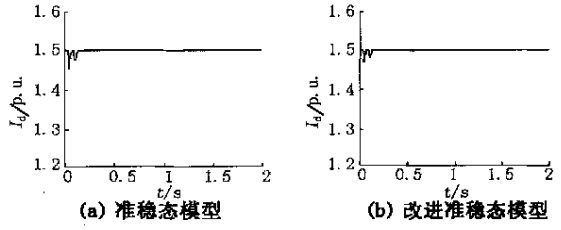

图 9　不对称故障时不同模型的结果

Fig. 9　Results of unsymmetrical fault

由图 8 可以看出, 在对称性故障的情况下, 此时只存在正序分量, 而无负序分量, 因此, 采用改进准稳态模型的计算结果和准稳态模型的计算结果完全一致。而这一点也正好说明了本文的模型和算法是正确有效的。

由图 9 可以看出, 当故障点离直流线较远时, 本文换流器的模型与准稳态模型之间略有差别, 这是因为原有的准稳态模型在处理不对称故障时, 不考虑直流系统的负序阻抗, 本身的误差所导致的。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

6 结论

通过对整流器、逆变器换相电压波形在各种情况下的直流电压的计算, 利用直流系统的调节功能, 在原有的准稳态模型的基础上进一步考虑了负序分量的影响, 通过实例说明本文所采用的方法是正确而有效的。

参考文献:

[1] 黄家裕, 汪 磊, 戚卓卓. 一个新的交直流互联系统暂态稳定程序[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(6): 1- 8.

[2] 戚卓卓. 交直流互联系统暂态稳定性分析计算[D]. 上海: 上海交通大学硕士论文, 1986.

[3] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985, 90- 95.

[4] 黄 凯. 交直流混合电力系统概率稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学硕士论文, 2002.

[5] DING Ming, WU Hong- bin, HUANG Kai. The effects of different DC control on probabilistic transient stability of hybrid AC/DC systems[A], 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings[C]. KunMing, China, 985- 988.

[6] 丁 明, 黄 凯, 李生虎. 交直流混合电力系统的概率稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 11- 16.

[7] 电科院. 电力系统分析综合程序, 暂态稳定(ST6. 1)用户手册[R]. 北京: 电力科学研究院, 1999, 1.

收稿日期: 2003-05-02; **修回日期:** 2003- 07- 22

作者简介:

吴红斌(1972-), 男, 博士研究生, 讲师, 目前从事保护与控制、FACTS 方面的研究和教学工作;

丁 明(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事电力系统可靠性、柔性输电系统、可再生能源技术等领域的研究和教学工作;

黄 凯(1978-), 男, 硕士, 从事柔性输电系统仿真与控制方面的研究工作;

李生虎(1974-), 男, 博士研究生, 讲师, 目前从事电力系统可靠性的研究和教学工作。

Modified quasi steady state model of converters in transient simulation of hybrid AC/DC systems

WU Hong- bin[1], DING Ming[1], HUANG Kai[2], LI Sheng- hu[1]

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The QSS (Quasi Steady State) model of converter which neglects the negative impedance of DC system will bring some errors when three phase unbalanced fault occurs in AC system. This paper takes into account the differences between rectifier and inverter and provides the computation method for DC voltage under the unbalanced commutation voltage. This model is applied in the transient simulation program of hybrid AC/DC systems with the modified QSS converter model, which pays attention to the negative impedance of DC system and acquires satisfying results.

Key words: hybrid AC/DC systems; rectifier; inverter; modified QSS model; transient simulation

继往开来 再攀高峰

—— 《继电器》将从 2004 年起由月刊改为半月刊

《继电器》遵循"关注学科发展, 理论联系实际, 面向应用, 为科研、生产一线服务"的宗旨, 为广大业内人士提供了一个活跃的学术交流园地。

《继电器》从 1973 年创刊以来, 已取得了一系列令人瞩目的成就: 多次被列为全国中文核心期刊、中国科技论文统计源期刊, 荣获"中国期刊方阵"双效期刊奖, 并于 2002 年被国际著名检索机构 I I 英国科学文摘 (SA) 和俄罗斯文摘杂志(AJ)收录, 同时被国内知名的期刊网站中国期刊网、万方数据库等收录, 在业界产生了很大的影响。

为了更及时、有效地反映学科发展, 紧跟时代步伐, 服务于科研、生产一线, 进一步拓展国内外的交流与合作, 《继电器》将从 2004 年起由月刊改为半月刊。

欢迎大家积极投稿、订阅、刊登广告, 一如既往地支持《继电器》!

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net