

不同控制方式对交直流系统潮流计算的影响

陶奕衫 闫广新

(新疆电力设计院 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 不同控制方式直接影响交直流网架的潮流计算结果, 针对典型的交直流混合输电系统, 给出了直流换流站的几种换流控制方式, 分别讨论了典型 3 机 7 节点的交直流输电系统在不同控制方式下的潮流计算, 针对不同控制方式的潮流计算结果进行了比较分析。仿真结果表明, 不同控制方式下交直流系统潮流结果存在一定差异, 每种控制方式有各自特点, 对实际计算提供了理论指导依据。

关键词: 高压直流输电; 潮流计算; 控制方式

Abstract: Different control modes will directly affect the power flow calculation results of AC - DC network frame , for a typical AC/DC hybrid system , several control modes for HVDC converter station are presented , the power flow calculation is discussed under different control modes in a typical 3 - generator 7 - bus AC - DC transmission system , and the calculation results based on different control modes are compared and analyzed. The simulation results show that there are some differences in power flow calculation results of AC - DC system and each control mode has its own characteristics , which provides a theoretical basis for the actual calculation.

Key words: HVDC; power flow calculation; control mode

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014)01 - 0010 - 03

0 引言

中国东部沿海地区经济发达, 负荷密集, 而能源中心却位于西部, 这就造成了供需矛盾, 能源与负荷发展极不平衡。发展高压、大容量、远距离输电就变得势在必行, 为了提高电网的稳定性与安全性, 各电网之间的互联已经进入了实施阶段^[1]。单纯交流输电在远距离输电时也存在其局限性, 成本高、网损大, 在非频率或非同步的互联电网中存在一定的缺陷。因此, 无论是经济上还是技术上, 高压直流输电都比交流电网有优势。随着全国电网互联的完成, 高压直流输电必将在西电东送中发挥重要作用。

换流站是高压直流输电系统的核心部分, 换流站灵活、多变的控制策略是保证直流输电系统安全稳定运行的前提条件。文献 [2] 详细介绍了 6 种主要的换流站控制方式。文献 [3] 对一种慢速控制方式进行了研究: 交直流混合系统变压器分接头控制, 并对分接头控制进行了数学建模。文献 [4] 对考虑多种控制方式的高压直流系统的潮流进行了计算。

在实际运行中, 不同控制方式下直流输电系统的潮流存在很大的差异, 整流、逆变的控制方式直接影响潮流结果, 快速控制与慢速控制的配合也对潮流的结果有一定影响。下面对几种控制方式进行了研究, 对比了电压波动下的潮流结果, 对其优缺点进行了分析, 并对潮流影响的程度进行了定量分析。

1 换流器数学模型

1.1 换流器的数学表达

高压直流输电的核心是换流器, 直流系统建模的实质就是换流器的建模。图 1 为交直流系统等效电路图^[5], 交流电通过整流、逆变成完整的传送给直流系统, X_c 、 R_d 分别为等效漏抗和直流电阻; U_d 、 I_d 分别为直流电压与直流电流。

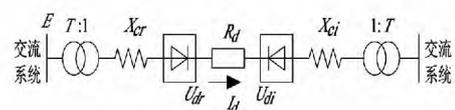


图 1 交直流系统等效图

换流器稳态数学模型^[6 7]如下。

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi T} E \\ I_d = \frac{U_{dor} \cos \alpha - U_{doi} \cos \beta}{3X_{Tr}/\pi + R_d + 3X_{Ti}/\pi} \\ U_d = U_{d0} \cos \alpha - 3X_{Tr} I_d / \pi \\ P_{ac} = U_d I_d \\ \gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} I_d X_T}{E} + \cos \beta \right) \\ \beta = \pi - \alpha \\ \gamma = \beta - \mu \\ \cos \varphi = \frac{\pi U_d}{3\sqrt{2} E} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 r 代表整流侧; i 代表逆变侧; α 为整流器触发角; β 为逆变器触发超前角; γ 为熄弧角; μ 为换相角; φ 为功率因数角; T 为换流变压器变比; U_{d0} 为空载直流电压; U_d 为直流侧电压; I_d 为直流电流; P_{ac} 为直流输送功率。

1.2 换流变压器变比计算

潮流计算时,通常需要考虑有载调压变压器的抽头级数,此时的实际变比为与抽头级数有关,如式(2)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{E}{E_N} \times \frac{U_{d0N}}{U_{d0}} \\ TC = \frac{\eta - 1}{\Delta \eta} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中 η 为变比; TC 为抽头级数; E_N 、 U_{d0N} 分别为交流侧母线额定电压和额定空载直流电压; $\Delta \eta$ 为换流变压器分接头步长。

2 控制方式

2.1 栅/门极控制

直流系统中,对直流侧电压和电流的控制响应速度较快,通常只有 1 ~ 4 ms,也称为快速控制,常用的 6 种控制模式有:定电压控制(CV)、定电流控制(CC)、定功率控制(CP)、整流器定触发角控制(CN)或逆变器定熄弧角控制(CEA)、定角控制和无功功率控制。

有时为了避免在系统故障时由于电压过低而造成的危害,还有两种保护性的控制模式:最小触发角限值控制和低电压限电流控制。

这里主要针对以上 6 种控制方式,分析研究它们在整流和逆变侧不同组合方式下的优缺点,为实际计算提供理论依据。

2.2 分接头控制

换流变压器分接头控制又叫慢速控制,调节时间较长,通常为 5 ~ 10 s。它起到对换流变压器有载调压分接头控制、调节的目的。这样就能将整流器或逆变器的角度维持在一定范围内,使直流电压或换流变压器侧绕组空载电压在正常的范围内。因此,在实际控制中要对快速控制和慢速控制合理配合。

3 算例分析

采用典型 3 机 7 节点交直流混联系统对潮流进行计算,系统图如图 2 所示。

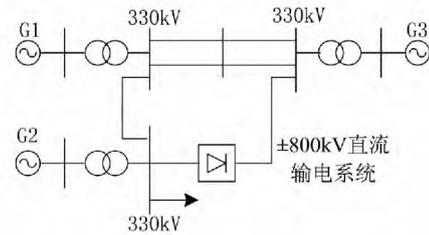


图 2 3 机 7 节点交直流系统图

模型为 330 kV 和 ±800 kV 交直流混联系统,该模型具体参数如下:直流系统 $I_N = 1.2$ kA, $U_N = 800$ kV, $P_N = 960$ MVA, $R = 19.8$ Ω; 触发角 $\alpha = 15^\circ$; 熄弧角 $\gamma = 15^\circ$; 换流变压器整流侧和逆变侧漏抗分别为 18.43 Ω、15.0 Ω。针对该模型,分别对所提到的几种控制方式组合,采用交替迭代法计算潮流。

下面对不同控制方式组合进行分析。

(1) α 角、 β 角固定。整流侧 α 角和逆变侧 β 角固定时,该方式下的潮流结果如表 1 所示。

表 1 整流侧角 逆变侧角固定时潮流结果

E/kV	I_d/kA	U_{d0}/kV	U_d/kV	P_{ac}/MW
371.95	1.20	759.23	721.0	911.07
372.27	1.20	770.48	732.3	924.57
373.10	1.12	777.31	741.6	870.58
373.38	1.05	783.63	732.0	822.81

计算结果表明,交流侧电压波动时,直流侧电流较为敏感。交流电压升高约为 2 kV 时,直流电流由 1.2 kA 跌落至 1.05 kA,直流侧电压升高约 24 kV,传输功率减小 89 MW。

由式(1)可知,当 α 、 β 固定时,空载直流电压正比于交流电压,且随交流侧变化波动较大,由此可以看出,在 α 、 β 固定时的直流系统稳定性差,不建议在实际工程中采用。

(2) α 角、 γ 角固定。整流侧 α 角和逆变侧 γ 角固定时,该方式下的潮流结果如表2所示。

表2 整流侧角、逆变侧角固定时潮流结果

E/kV	I_d/kA	U_{d0r}/kV	U_{d0i}/kV
370.87	1.2	777.63	739.47
367.74	1.3	777.07	759.85
364.58	1.4	775.76	735.76
361.34	1.5	773.84	726.16
358.08	1.6	771.44	720.56

计算结果表明,直流侧电流波动时,逆变侧电压较为敏感。当直流侧电流略有增加,逆变侧和整流侧电压都会下降,但逆变侧下降幅度远大于整流侧。直流侧电流升高越多,整流和逆变侧的压差就越大,进而使电流进一步增加,这种恶性循环将严重影响电网安全。

(3) 电流 I_d 、 γ 角固定。整流侧电流 I_d 和逆变侧 γ 角固定时该方式下的潮流结果如表3所示。

表3 整流侧 I_d 、逆变侧 γ 固定时角潮流结果

E/kV	$\alpha/(^\circ)$	U_{d0r}/kV	U_{d0i}/kV	P_{ac}/MW
370.88	14.8	776.63	739.47	931.95
368.82	16.1	777.52	739.36	933.02
366.60	16.9	777.44	739.23	932.92
364.31	18.0	777.31	739.12	932.77
361.85	19.2	777.20	738.99	932.64

计算结果表明,交流侧电压波动时,直流侧电流、电压、功率基本稳定,变化不大。当整流侧电流 I_d 和熄弧 γ 角固定时,交流侧电压波动 α 角可自我调节。由式(1)可知,直流侧电压、功率也不随交流侧电压波动而变化,这种控制方式能提供持续、稳定的功率输出,是较为合理的控制方式。

(4) α 角、 I_d 固定。整流侧 α 角和逆变侧电流 I_d 固定时,该方式下的潮流结果如表4所示。

计算结果表明,交流侧电压波动时,通过调整熄弧角可使直流侧电流保持恒定,但电压会有波动。由式(1)可知, α 角、 I_d 固定,交流侧电压直接影响直流侧。这种控制方式适用于整流侧电压骤降或逆变侧电压上升的情况。

表4 整流侧角、逆变侧 I_d 固定时潮流结果

E/kV	$\gamma/(^\circ)$	U_{d0r}/kV	U_{d0i}/kV
373.97	17.7	777.08	742.12
376.28	18.9	771.44	736.44
378.69	20.0	779.88	730.48
381.30	20.9	759.24	724.28

(5) I_d 、 U_d 固定。整流侧电流 I_d 和逆变侧电压 U_d 固定时,该方式下的潮流结果如表5所示。

表5 整流侧 I_d 、逆变侧 U_d 固定时潮流结果

E/kV	$\alpha/(^\circ)$	$\gamma/(^\circ)$
372.62	15.0	18.00
373.77	15.5	18.80
375.60	17.0	20.00
377.03	18.0	21.00
377.39	18.5	21.65

计算结果表明,交流侧电压扰动时,直流侧电压、电流基本维持稳定,是较为理想的控制方式。计算数据表明,交流电压扰动,熄弧角变化明显,实际采用中应该综合考虑利弊。

(6) P_d 、 γ 角固定。整流侧功率 P_d 和逆变侧 γ 角固定时,该方式下的潮流结果如表6所示。

表6 整流侧 P_d 、逆变侧 γ 角固定时潮流结果

E/kV	U_{d0r}/kV	$\alpha/(^\circ)$	I_d/kA	P_{ac}/MW
346.76	752.83	15.0	2.00	1 505.66
341.78	771.95	14.1	1.95	1 505.30
336.41	792.64	13.5	1.90	1 506.01

计算结果表明,直流侧电压波动时,换流站调整 α 角,从而改变整流侧电流 I_d ,使输出功率保持稳定。该控制方式适合恒功率传送,但交流侧电压波动过大时可能导致换流器过电流。

4 结 论

对不同控制方式下交直流混联系统的潮流计算进行了研究,分析了各种控制方式下的优缺点,结果表明:对于高压直流输电系统而言,逆变侧定角或定电压,整流侧定功率或定电流控制,在理论上是较为合适的控制方式,但在实际控制中要根据具体情况采用不同控制方式相互配合,所做研究对实际工程提供了理论依据。

(下转第46页)

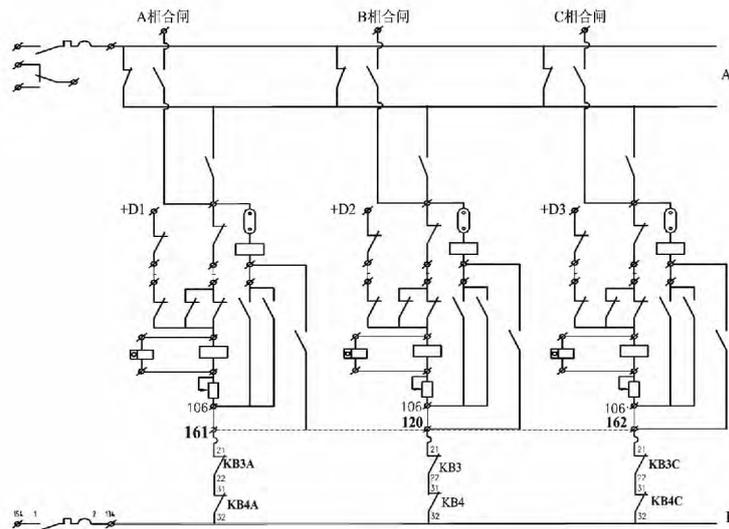


图 3 开关汇控箱 SF₆ 空压低、油压低闭锁各闸连线

置具备分相重合的功能,还应特别注意开关传动试验的验收,重点检查控制回路是否满足分相闭锁合闸的要求,以确保自适应重合闸分相顺序重合功能的实现。

(2) 液压机构断路器采用油压储能,储能效果极易受到气候、零部件的工艺条件等因素的影响而造成压力不足够支持断路器实现分-合-分的循环操作,导致重合闸不成功,在运行中应特别注意加强对液压系统的检查,保证设备运行条件的良好性。

参考文献

[1] 郑玉平,黄震,张哲,等.同杆并架双回线自适应重合闸的研究[J].电力系统自动化,2004,28(22):58-62.

[2] 郑玉平,张哲,等.同杆双回线的继电保护及自动重合闸.第二十八届中国电网调度运行会议论文集[M].北京:中国电力出版社,2003.

[3] 李斌,李永丽,盛鹏,等.带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):52-56.

[4] 朱建红,陈福锋,等.新型同杆双回线自适应重合闸方案研究[J].电力自动化设备,2007,27(4):31-33.

[5] 沈军,张哲,郑玉平,等.500 kV同杆双回线自适应重合闸方案[J].电力设备,2006,7(1):20-23.

[6] 梁懋,钟泽章,殷光辉,等.JCJZ-21A型多相重合闸装置[J].电力自动化设备,1990,3(1):43-54.

作者简介:

李利红(1984),工程师,技师,从事变电运行工作。

(收稿日期:2013-08-19)

(上接第 12 页)

参考文献

[1] 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.

[2] 赵婉君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.

[3] 刘崇茹,张伯明,孙宏斌.交直流混合输电系统的换流变压器分接头控制[J].电网技术,2006,9(30):22-27.

[4] 杨彬,叶鹏,孙保功,等.多种控制方式下 HVDC 系统的潮流计算[J].电网技术,2010,34(6):139-143.

[5] 陈厚合,李国庆,姜涛.控制方式转换策略下的改进交

直流系统潮流算法[J].电网技术,2011,35(8):93-98.

[6] 胡金磊,张尧,李聪.交直流电力系统概率潮流计算[J].电网技术,2008,32(18):36-40.

[7] 倪以信.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002.

[8] 王毅,侯俊贤,马士英,等.用于调度计划安全稳定校验的潮流自动整合调整方法[J].电网技术,2010,34(4):100-104.

作者简介:

陶奕彩(1971),工程师,主要从事电力系统规划设计工作。

(收稿日期:2013-09-17)