

1 200 kV 特高压双极直流发生器的暂态过程分析

王 枫, 傅正财, 孙 伟, 陈 坚, 赵 刚

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 特高压直流试验线段担负着开展环境影响研究、为特高压直流输电提供技术支撑等重要任务。作为特高压直流试验线段主电源的 1 200 kV/500 mA 双极直流发生器的稳定运行对试验基地各项研究的正常开展至关重要。结合发生器的初步设计, 采用电磁暂态分析程序 ATP-EMTP 对该发生器在短路放电情况下以及充电过程中的暂态过程进行仿真计算。分析表明, 发生器在充电过程中主电容器上出现的最高过电压为 1.35 倍。负载放电或发生输出短路时, 硅堆上的暂态峰值电流可达正常运行时的 9.3 倍。输出保护电阻应按承受全电压下 50 A 短路电流设计。这些结论为该发生器的研制和运行提供了依据。

关键词: 特高压直流; 双极直流发生器; 暂态分析; ATP-EMTP

中图分类号: TM832

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0012-04

Transient Analysis of a 1 200 kV Bipolar UHVDC Voltage Generator

WANG Feng, FU Zheng-cai, SUN Wei, CHEN Jian, ZHAO Gang

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: UHVDC test line is applied to research of environmental influence and to technical support to the construction of UHVDC transmission systems. Stable operation of the 1 200 kV/500 mA bipolar UHVDC voltage generator, which is the main power source of the experimental line in a test base, is very important for all the researches. This paper adopts the electromagnetic transient analysis software ATP-EMTP to simulate the transient characteristics of the generator in short-circuit discharge and charging processes. Simulation results show that the maximum overvoltage on the main capacitors is 1.35 times of the normal one during the charging process, and the maximum transient peak current on the high voltage silicon stack may reach 9.3 times of the normal one under the EUT flashover or output short-circuit status. The output protecting resistor should be designed for operating under full-voltage with 50 A short-circuit current. This study may benefit design and construction of the bipolar UHVDC generator.

Key words: UHVDC; bipolar DC voltage generator; transient analysis; ATP-EMTP

0 引言

在我国, 发展特高压直流输电技术已经势在必行^[1-5]。特高压直流试验基地是国家电网公司为建设直流特高压电网而兴建的重要研究平台。其中±1 200 kV 特高压双极直流发生器承担着提供试验线路电压的重任, 是基地的关键设备之一。该设备的输出电压和输出电流等参数以及长期全天候运行等要求均为国内外所未有过。对该直流发生器的研究尚属首次, 尤其是在发生器短路放电情况下的暂态过程方面的认识还很不足。而作为需要长期全天候运行的试验主电源, 短路暂态情况是研制和运行中必须考虑的问题。因此, 对这种直流发生器的暂态

过程进行研究具有重要意义。笔者采用 EMTP 仿真软件分析发生器在短路放电和充电过程中的暂态过程, 为发生器的研制和运行提供技术支持。

1 发生器回路设计与参数选择

双极直流发生器的主回路采用 4 级对称倍压整流回路。交流电源的正半波和负半波都向电容补充电荷, 使输出电压脉动 δU 和电压降落 ΔU 能得到改善^[6-12]。其工作原理见图 1, 图中给出的为正极, 负极只需换接高压硅堆方向。

2 建模与仿真

根据发生器的设计模型建立 ATP-EMTP 仿真模型并进行仿真计算, 其仿真计算模型见图 2。仿真参数按初步设计, 变压器变比为 1:15, 漏抗为 7%, 交

收稿日期: 2009-03-24; 修回日期: 2009-07-15

基金项目: 上海市浦江人才计划(08PJ14316)。

作者简介: 王 枫(1983), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压试验设备与测试技术。

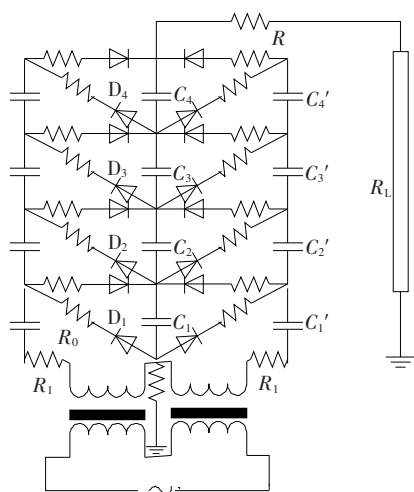


图1 双极直流发生器的电路原理图

流保护电阻为 $250\ \Omega$, 直流保护电阻为 $25\ \text{k}\Omega$, 高压硅堆保护电阻为 $100\ \Omega$, 负载阻抗为 $2.4\ \text{M}\Omega$, 充电电源输出双极设置相差 180°

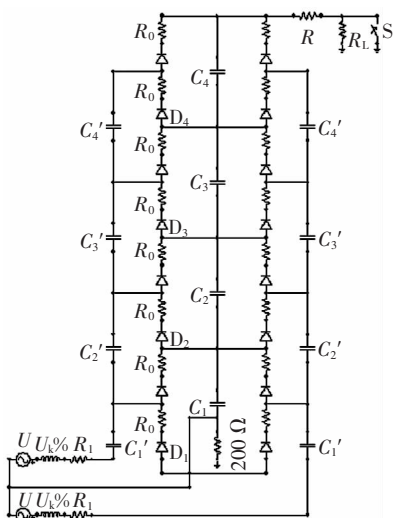


图2 双极直流发电器的计算模型

图2中, R_1 为交流保护电阻; R 为直流输出保护电阻; R_L 为负载; R_0 为高压硅堆保护电阻。

参考文献[13,14]的电容器选择原则, 初步设计电容器取 $C=0.5\ \mu\text{F}/400\ \text{kV}$ 及 $C'=1\ \mu\text{F}/200\ \text{kV}$ 。

参考高压硅堆的一些选择原则^[15], 高压硅堆反峰电压取 $800\ \text{kV}$, 工作平均电流取 $250\ \text{mA}$, 选型 $800\ \text{kV}/2\ \text{A}$, 半周波暂态过电流能力为 $50\ \text{A}$ 。

按照国家标准要求, 直流高压试验设备的纹波因数 S 应小于 3% , 试验电压(算术平均值)在 $60\ \text{s}$ 内应保证在规定值的 $\pm 1\%$ 以内^[16]。发生器的设计指标为额定输出 $1\ 200\ \text{kV}/500\ \text{mA}$; 电压脉动系数 S 小于 3% 。

发生器从充电到稳态输出的直流电压见图3, 输出电压最大值为 $1\ 208.2\ \text{kV}$, 最小值为 $1\ 192.3\ \text{kV}$,

输出直流电压为 $1\ 200.25\ \text{kV}$, 电压纹波因数为 0.66% 。图4为发生器的输出电流波形。

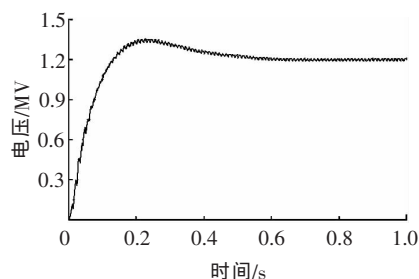


图3 发生器的输出电压波形

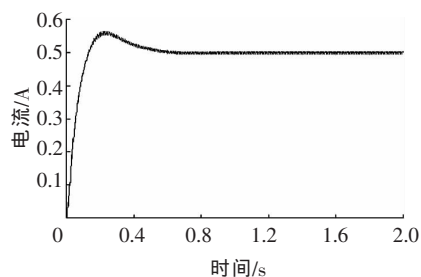


图4 发生器输出电流波形

3 暂态仿真结果与分析

3.1 充电过程的暂态分析

实际试验时发生器通常是缓缓升压的。在此考虑最严重的调压器全电压合闸充电情况。发生器从0开始充电, 约 $0.7\ \text{s}$ 达到稳态, 图5~7为各主要元件充电时的电压波形。

从图5可见, 直流柱上第一级滤波电容在发生器充电过程中承受 $465\ \text{kV}$ 的电压, 约是其额定电压的 1.16 倍。

从图6可见, 交流柱上的充电电容器在发生器

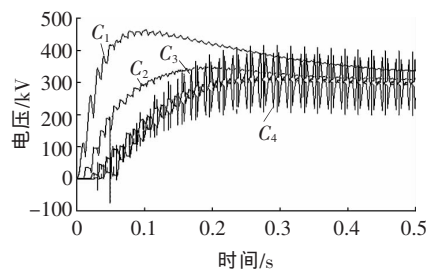


图5 直流柱上滤波电容在发生器充电时的电压波形

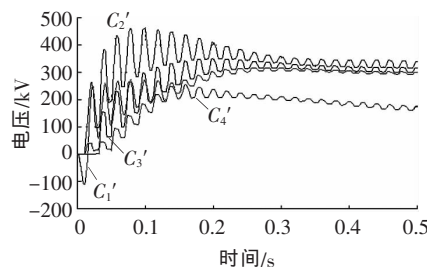


图6 交流柱上电容器在发生器充电时的电压波形

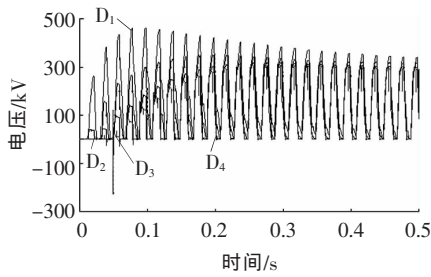


图7 各级高压硅堆在发生器充电时的电压波形

的充电过程中 C_1' 上承受的电压为 270 kV，是其额定电压的 1.35 倍， C_2' 上的电压是 462 kV，是其额定电压的 1.16 倍。

从图 7 可见，在发生器充电过程中，高压硅堆只有 D_1 上的电压超过其额定工作电压，为 460 kV，是其额定工作电压值的 1.15 倍。

3.2 短路暂态分析

为了研究发生器的短路暂态情况，在 $t=2\text{ s}$ (充电电源电压正向过零点) 时对发生器负载短路，仿真结果如下。

3.2.1 交流保护电阻上的暂态电流

图 8 为交流保护电阻上的暂态电流波形，可以看出，在发生器正常运行时，电流幅值为 5 A，发生器负载短路后电流幅值为 39.6 A，即短路电流限值在发生器正常运行时的 8 倍以内。

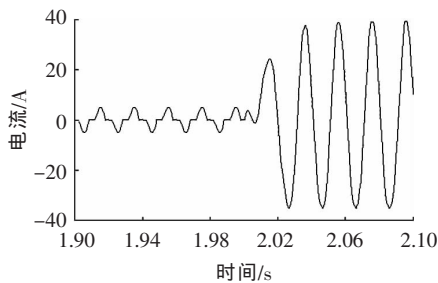


图8 交流保护电阻上的暂态电流波形

3.2.2 直流保护电阻上的暂态电流

直流保护电阻上的暂态电流波形见图 9。

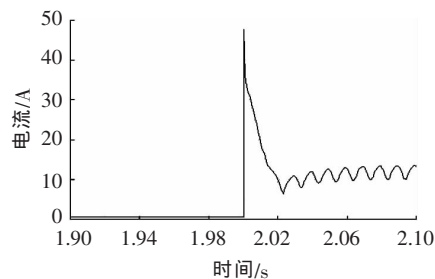


图9 直流保护电阻上的暂态电流波形

从图 9 可见，在发生器负载短路瞬间，直流保护电阻上的电流最大为 47.8 A，约经一个周波时间降

为 10 A 左右。

3.2.3 高压硅堆上的暂态分析

各级高压硅堆上的暂态电流波形见图 10，发生器负载短路前后各级高压硅堆上的暂态峰值电流见表 1。

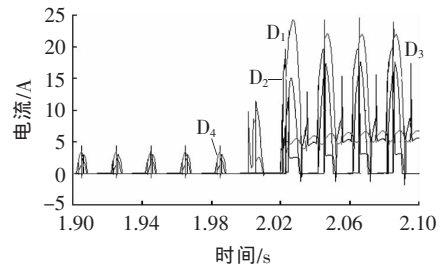


图10 各级高压硅堆上的暂态电流波形

表 1 各级高压硅堆上的电流峰值 A

	稳定运行时	负载短路后	峰值电流倍数
D_4	3.40	7.50	2.20
D_3	4.20	16.00	3.80
D_2	3.85	19.80	5.14
D_1	2.83	24.50	8.66

从表 1 中可见，发生器负载短路时，第一级高压硅堆上的电流最大，峰值电流倍数为 8.66。

3.3 讨论

发生器负载在不同时刻发生短路的暂态过程是有差别的。在此，以第一级高压硅堆 D_1 上的电流为例进行说明。如充电电源电压正向过零点时发生器负载短路， D_1 上的峰值电流倍数为 8.66；当充电电源电压过负向峰值时，发生器负载短路，则仿真计算得 D_1 上的峰值电流倍数为 9.00；如充电电源电压负向过零点时，发生器负载短路，则 D_1 上的峰值电流倍数也为 8.66；而当充电电源电压达到正向峰值时，发生器负载短路，则 D_1 上的峰值电流倍数为 9.30。无论发生器在任何时刻负载短路，硅堆暂态电流均在硅堆设计选型的过电流承受能力范围之内。

上述暂态计算分析结果已用于国家电网公司特高压直流试验基地 1 200 kV/500 mA 双极直流发生器的研制。根据方案设计，制造的特高压双极直流发生器已于 2007 年 6 月在国家电网公司特高压直流实验基地投入试运行。投运后运行稳定，各级高压硅堆、电容器和保护电阻等关键部件均经受了运行考验。

4 结论

对特高压双极直流电压发生器进行了充电到稳定过程和负载短路放电情况下的暂态过程分析，得

出以下结论:

(1)在电源向高压发生器充电过程中,第一级电容器和硅堆都有轻微过电压,其中直流柱上滤波电容 C_1 上的过电压倍数是 1.16, D_1 上的过电压倍数是 1.15, 交流柱上的电容器 C_1' 上的电压倍数是 1.35, C_2' 上的过电压倍数是 1.16。设计中电容器的耐压应在 1.4 倍以上。

(2)发生器负载短路后,直流保护电阻上瞬时承担全部输出电压,短路电流峰值小于 50 A;第一级硅堆 D_1 上的暂态峰值电流最大,与正常运行时相比,峰值电流倍数为 8.66。

(3)由于发生器负载短路时,直流保护电阻承受的电压即为输出电压,要求直流保护电阻的耐压按额定输出电压设计并预留一定裕度;交流柱上的充电电容器 C_1 在发生器的充电过程中承受的过电压是其额定电压的 1.35 倍,设计中电容器的耐压应在 1.4 倍以上。

参考文献:

- [1] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [2] 尚春.特高压输电技术在南方电网的发展与应用[J].高压技术,2006,32(1):35-37.
- [3] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.

- [4] 黄道春,魏远航,钟连宏,等.我国发展特高压直流输电中的一些问题的探讨[J].电网技术,2007,31(8):6-12.
- [5] 舒印彪.中国直流输电的现状 & 展望[J].高压技术,2004,30(11):1,2,20.
- [6] 张仁豫.高压实验技术[M].北京:清华大学出版社,1982.
- [7] 华中工学院,上海交通大学.高压实验技术[M].北京:水利电力出版社.
- [8] DOMMEL H W(加拿大).电力系统电磁暂态计算理论[M].李永庄,林集明,曾昭华,译.北京:水利电力出版社,1991.
- [9] KUFFEL E,ZAENGL W. S.High-voltage Engineering: Fundamentals[M].Oxford,New York:Pergamon Press,1984.
- [10] GALLAGHER T J,PEARMAN A J.High Voltage: Measurement, Testing, and Design [M].Chichester;New York: Wiley, 1983.
- [11] RYAN H M.High Voltage Engineering and Test[M].Stevenage, Herts.,U.K.:Peregrinus on Behalf of the Institution of Electrical Engineers,1994.
- [12] TRUMPY K,BRANDLIN F,FREIBERG E.High Power HVDC Test Equipment for Pollution Testing [C]//7th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH),Dresden, Germany,1991:1-76.
- [13] JB/T 8168-1999.脉冲电容器及直流电容器[S].2000.
- [14] 孙才新,司马文霞,赵杰,等.特高压输电系统的过电压问题[J].电力自动化设备,2005,25(9):5-9.
- [15] 项兴荣.高压硅堆在电力系统直流高压电气实验装置中的应用[J].半导体技术,1996,6(3):62-64.
- [16] GB/T 16927.1-1997.高压实验技术第一部分:一般实验要求[S].1997.

(上接第 11 页)

通过表 1 可以看出,在一定范围内,防晕环罩入深度的改变并不能有效地改善其周围空气的电场强度,因此选用初始给定的罩入深度。

通过表 2 可以看出,在一定范围内,增大防晕环外径可改善其周围空气的电场强度。考虑过大的环外径带来的其他不安全因素,认为环外径 2600 mm 是合适的。

通过表 3 可以看出,在一定范围内增大防晕环的管径可以有效改善其周围空气的电场强度。当截面管径增大到 350 mm 时,高压端防晕环外侧空气的最大电场强度为 14.3 kV/cm。

4 结论

通过对特高压直流母线 MOA 的电位和电场分布的计算和分析,可以得出下面的结论:

(1)MOA 在直流持续运行电压下,氧化锌电阻片上承担相同的电压,不存在承担电压不均匀的

现象;防晕环的作用是降低局部过高场强,防止电晕发生;

(2)通过对防晕环结构进行优化,结果认为,大防晕环罩入深度和环外径不变、截面管径增大到 350 mm 是合适的。

参考文献:

- [1] 王玉平,张一鸣.特高压直流避雷器的技术特点与分析[J].电力设备,2007,8(3):15-19.
- [2] 李立.特高压直流输电的技术特点与工程应用[J].电力设备,2006,7(3):1-4.
- [3] Q/GDW 144.±800 kV 特高压直流换流站过电压保护和绝缘配合导则[S].2006.
- [4] 岳亚丽,朱海涛,张源斌.氧化锌避雷器电阻片电位分布测量系统的研制[J].高压技术,2006,32(10):22-24.
- [5] 王世山,何计谋,金强.悬挂式避雷器电位分布计算及均压环优化配置[J].电瓷避雷器,2005(3):24-28.
- [6] 王仲奕,董心军,赵彦珍.高压交直流电容式套管内部电场的分析比较及改进[J].高压电器,2003,39(3):9-11.