

大容量冲击发电机短路电流衰减特性研究

汪海波, 万德春, 洪 深

(南瑞集团公司 / 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 简单介绍了大容量冲击发电机的工作原理, 从大功率试验室的运行角度出发, 研究了国产 6 500 MV·A 冲击发电机短路电流的衰减特性, 建立冲击发电机电流衰减的 MATLAB 仿真模型。对 3 种典型外阻抗条件下施加不同强励倍数时的短路电流衰减特性进行仿真, 初步确定了在不同外阻抗条件下满足相关试验标准要求要求的强励倍数, 对大功率试验室的运行具有参考意义。

关键词: 冲击发电机; 短路电流; 大功率试验室; 强迫励磁; 仿真

中图分类号: TM31

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)05-0026-04

在电力系统中, 高压电器的稳定、可靠运行是整个系统正常、高效工作的前提条件, 高压电器的型式试验是检验其性能的重要环节。对高压电器而言, 由于电弧物理过程的复杂性、多变性, 目前仍然没有一种电弧模型能对电弧特性进行准确的计算分析, 而只能作为高压电器设计的辅助手段^[1], 因此产品受电弧特性影响的开断性能需要在大功率试验室中进行检测, 大功率试验室仍是研发高压开关设备的必要手段。大功率试验室的电源可以由网络或大容量冲击发电机提供。由于冲击发电机不受系统发展的制约和系统运行的影响, 世界上许多著名的大功率试验室都有安装冲击发电机, 如荷兰的 KEMA、意大利的 CESI、中国的 XIHARI 等^[2]。文献[3]对国内外大功率试验室的各种型号冲击发电机进行了较为详细的说明, 介绍了冲击发电机的发展状况; 文献[4]结合冲击发电机特点和相关试验标准的要求对冲击发电机的选型进行阐述; 文献[5]介绍了国内冲击发电机的生产情况, 并提出国内研制大容量冲击发电机的基本技术要求; 文献[6-8]以电机设计制造的角度从定、转子结构特点、机组布局、电动力分析等方面介绍国产 6 500 MV·A 冲击发电机; 文献[9]介绍了双馈变频调速系统在 6 500 MV·A 冲击发电机机组中的应用, 实现了机组的 60 Hz 调速运行。文中从大功率试验室的运行角度出发, 对 6 500 MV·A 冲击发电机短路电流的衰减特性进行仿真研究, 分析了 3 种典型外阻抗条件下施加不同强励倍数时的短路电流衰减特性。

1 冲击发电机

1.1 冲击发电机特点

冲击发电机又名短路试验发电机, 专门用于短路试验。冲击发电机的每次试验都相当于常规发电机的出线端事故短路, 冲击电流有效值可达上百千安, 对

定、转子的绕组和结构有特殊的要求^[10]。

冲击发电机一般有以下 3 种特征容量: (1) 型式容量。是指与该台冲击发电机定、转子尺寸及重量相当的汽轮发电机的额定容量, 也称额定视在功率。(2) 出端容量。是指在额定电压下, 不加任何外阻抗, 只对冲击发电机超瞬变电抗 X_d'' 计算的最大三相对称短路容量。(3) 允许使用容量。是指电机制造厂或者试验站为保证冲击发电机的使用寿命而规定的试验使用容量。随着电力系统的快速发展, 高压开关设备的电压和开断电流不断增长, 作为大功率试验室电源的冲击发电机有尽可能大的短路(开断)容量^[11]。表 1 列出了目前国内外投入使用的大型冲击发电机特征容量。

表 1 大型冲击发电机的特征容量 MV·A

制造厂	型式容量	出端容量	允许使用容量
瑞士 BBC	280	6 570	3 750
日本东芝	200	7 400	4 900
哈尔滨电机厂	200	6 500	3 150

1.2 试验对冲击发电机的要求

以冲击发电机为试验电源的大功率试验室如图 1 所示, 试品位于试验小室内, 整个回路应能满足不同电流、电压等级的试品。通过调节限流电抗器值(L)来满足不同的试验电流, 调节试验变压器(TR)变比来满足不同的电压等级。

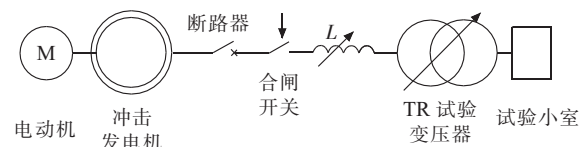


图 1 大功率试验室回路

对一台冲击发电机评定, 不仅要看冲击发电机的短路容量和短路电流的大小, 还要考虑短路电流的衰减特性如何。冲击发电机三相短路情况下的电流衰减趋势可由式(1)表示^[3,4]:

$$I = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \times \left[\frac{k}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{k}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \quad (1)$$

式中: U_N 为额定线电压; X_d'' 为超瞬变电抗; X_d' 为瞬变电抗; T_d'' 为超瞬变时间常数; T_d' 为瞬变时间常数; k 为强迫倍数(强励电压与空载励磁电压之比)。实际试验回路中需要外接阻抗(X_e), 此时的冲击发电机短路电流衰减曲线由式(2)表示:

$$I = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \times \left[\frac{k}{X_d + X_e} + \left(\frac{1}{X_d' + X_e} - \frac{k}{X_d + X_e} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'' + X_e} - \frac{1}{X_d' + X_e} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \quad (2)$$

在 GB 1984—2003 附录 B 中对高压断路器在型式试验中试验参数的公差提出了具体的要求, 例如高压断路器基本短路试验方式 T100s(断路器进行 100% 容量的完全对称开断试验), 规定试验值为额定短路开断电流的 100%, 试验公差为 0~+5%, 即只允许 5% 以内的正公差; 标准同时对试验参数中工频恢复电压(U_{RV})提出了试验公差为 $\pm 5\%$ 的要求, 由于 U_{RV} 与开断电流 I 存在线性关系, 即通过强励来补偿短路电流的同时也就对工频恢复电压做了补偿。这不但要求试验回路的阻抗配置合理, 同时还要求设定合适的强励电压值来保证冲击发电机的短路电流特性, 以满足高压断路器的试验参数及其公差符合相关标准的要求。

2 国产大容量冲击发电机

2.1 6 500 MV·A 冲击发电机特性

我国生产的大容量冲击发电机主要有 DSF-100-2 型(型式容量为 100 MV·A, 出端容量为 3 200 MV·A) 与 DSF-200-2 型(型式容量为 200 MV·A, 出端容量为 6 500 MV·A) 冲击发电机, 均由哈尔滨电机厂生产制造。DSF-100-2 型短路发电机容量小, 电气暂态参数差, 不能进行有效的强励, 工频电流和工频恢复电压衰减大, 已经不能满足当代大容量试验室的发展要求^[5]。DSF-200-2 型冲击发电机是在 DSF-100-2 型冲击发电机的运行实践和借鉴国外同类型设备的基础上设计开发的, 并于 2003 年投入商业运行。6 500 MV·A 冲击发电机的设计参数如表 2 所示。

2.2 短路电流衰减特性仿真及分析

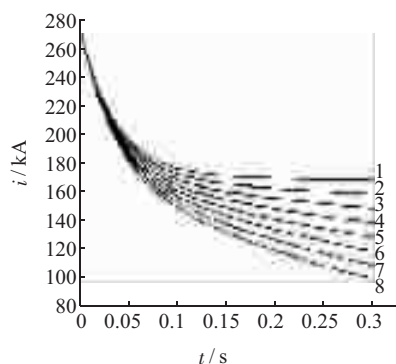
根据 6 500 MV·A 冲击发电机的设计参数和三相短路情况下电流衰减曲线计算公式, 建立其 MATLAB 仿真模型, 仿真时间为 0~0.3 s, 表示冲击发电机从 0 时刻开始短路持续 0.3 s 之后恢复到开路状态。

X_e 为 0 时不同强励倍数下的相电流有效值曲线如图 2 所示。从响应曲线来看, 需要 $k > 15$ 才能支撑短

表 2 6 500 MV·A 冲击发电机设计参数

参数	数值
三相出口短路容量/(MV·A)	6 500
额定电压 U_N /kV	14
最高运行电压 U_{max} /kV	15
额定频率 f /Hz	50/60
额定转速 n /(r·min ⁻¹)	3 000/3 600
设计强励倍数	16.7
超瞬变电抗 X_d'' 饱和值/m Ω	29.6
瞬变电抗 X_d' 饱和值/m Ω	46.6
同步电抗 X_d /m Ω	743
超瞬变时间常数 T_d'' /s	0.035
瞬变时间常数 T_d' /s	0.494

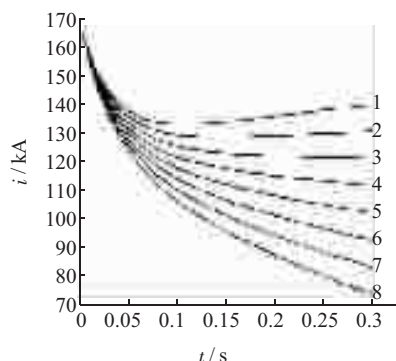
路电流在 0.3 s 内没有明显衰减的现象。 $k \leq 15$ 时存在短路电流衰减的情况, 并随着强励倍数的减少, 短路电流会成比例下降。



1. $k=15$; 2. $k=13$; 3. $k=11$; 4. $k=9$; 5. $k=7$; 6. $k=5$; 7. $k=3$; 8. $k=1$

图 2 X_e 为 0 时不同强励倍数下的相电流有效值曲线

X_e 为 18.5 m Ω 时不同强励倍数下相电流有效值曲线如图 3 所示。从响应曲线来看, $11 < k < 13$ 的范围内即可满足短路电流在 0.3 s 不存在明显衰减的要求。当 $k \geq 13$ 时会有短路电流上翘的现象, 并随着强励倍数的增加, 短路电流会成比例上升。



1. $k=15$; 2. $k=13$; 3. $k=11$; 4. $k=9$; 5. $k=7$; 6. $k=5$; 7. $k=3$; 8. $k=1$

图 3 X_e 为 18.5 m Ω 时不同强励倍数下相电流有效值曲线

对 X_e 为 18.5 m Ω 条件下 $k=1$ 和 $k=11$ 两种强励电压下的短路电流响应进行比较, 如图 4 所示。 T 为 0.3 s

时, $k=11$ 与 $k=1$ 对应的短路电流有效值 I_{k11}, I_{k1} 分别为 120.8 kA, 72.49 kA。以 I_{k11} 为试验需要的短路电流计算, I_{k1} 存在 40% 的衰减量, 即 $I_{k1}/I_{k11}=0.6$ 。0.3 s 时的工频恢复电压 U_{RV} 及其公差 Δ 计算见式(3)和(4):

$$U_{RV-ki} = \sqrt{3} I_{ki} \times (X_d' + X_e) \quad (3)$$

$$\Delta_{ki} = \frac{U_N - U_{RV-ki}}{U_N} \quad (4)$$

式中: U_{RV-ki}, I_{ki} 分别为不同强励倍数下的工频恢复电压和开断时的短路电流有效值。通过计算可得: U_{RV-1} 为 8.173 kV, Δ_{k1} 为 41.62%; U_{RV-11} 为 13.62 kV, Δ_{k11} 为 2.71%, $\Delta_{k11} < 5\% < \Delta_{k1}$ 。可见, 施加适当的强励倍数与不加强励, 对冲击发电机的短路电流及工频恢复电压存在非常明显的影响。

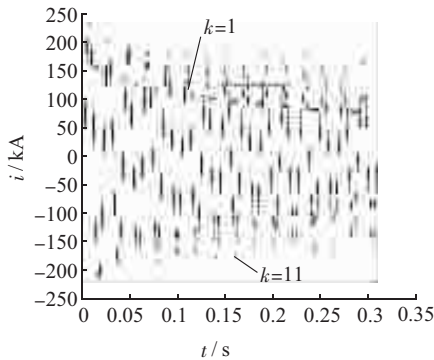


图 4 X_e 为 18.5 mΩ 时 $k=1$ 与 $k=11$ 时的相电流响应

X_e 为 36 mΩ 时不同强励倍数下相电流有效值曲线如图 5 所示。从响应曲线来看, 在 $9 < k < 11$ 的范围内即可满足短路电流在 0.3 s 不存在明显衰减的要求。当 $k \geq 11$ 时短路电流会有上翘的现象。

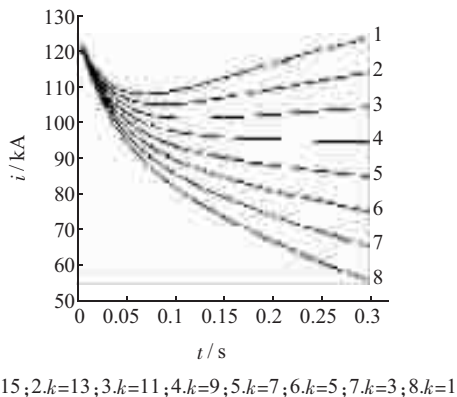
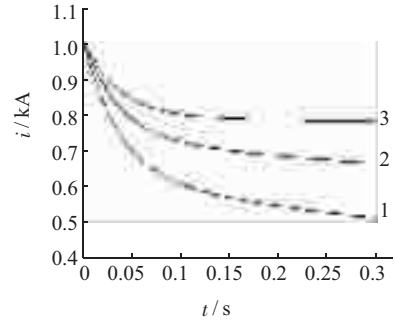


图 5 X_e 为 36 mΩ 时不同强励倍数下相电流有效值曲线

同一强励倍数下 ($k=9$), 3 种不同外阻抗条件下短路电流衰减情况如图 6 所示, 在同一强励电压下, 外接阻抗越小电流衰减越厉害, 随着外接阻抗的增加电流补偿效果越明显。

3 种不同外阻抗以及不同强励倍数条件下, 在 0.3 s 时短路电流有效值分布如图 7 所示。随着外接阻抗



1 为外接阻抗 0; 2 为外接阻抗 18.5 mΩ; 3 为外接阻抗 36 mΩ

图 6 k 为 9 时 3 种 X_e 条件下的短路电流衰减曲线

增加, 短路电流有效值逐步减少, 对应的允许使用容量也同步降低; 在同一外阻抗条件下, 短路电流随着强励倍数的增加而变大。

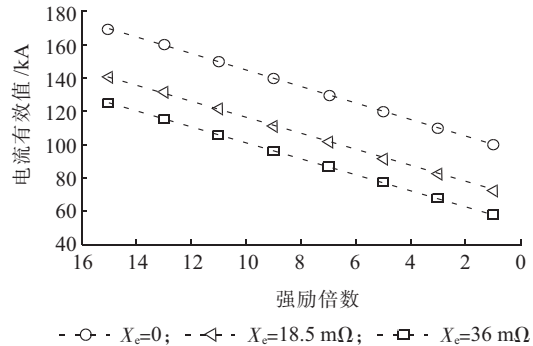


图 7 不同 X_e 和强励倍数下短路 0.3 s 时的相电流有效值

4 结束语

大容量冲击发电机作为试验电源广泛的应用于大功率试验室, 冲击发电机组的整体性能决定了大功率试验室的检测能力。依据国产 6 500 MV·A 冲击发电机的相关参数建立其仿真模型, 用来分析其短路电流的衰减特性。从仿真结果来看, 冲击发电机的短路电流特性与强励电压有密切的联系, 可根据试验需求调整试验回路阻抗, 通过设定强励电压在某一范围内即可控制冲击发电机的短路电流衰减量, 以保证试验参量及其公差满足相关标准的要求。通过仿真可以初步确定满足不同试验需求时的强励电压范围, 对今后大功率试验室的运行具有较为重要的参考意义。

参考文献:

[1] 吴盛刚, 李 炜, 李玉春. 浅谈大功率试验室未来的发展趋势[J]. 华通技术, 2006(1): 31-33.
 [2] 顾霓鸿. 世界电力大功率试验站简介[J]. 国际电力, 2001(2): 51-53.
 [3] 李重光. 国外大容量冲击发电机概况[J]. 高压电器, 1975(4): 55-64.
 [4] 臧尔诚. 冲击发电机选型初探[J]. 大电机技术, 1986(5): 10-15.
 [5] 王征庆. 大容量试验短路发电机[J]. 高压电器, 1988(3): 27-35.

- [6] 房庆辉,张长发,赵金海,等. 6 500 MV·A 冲击发电机转子平衡特点[J].大电机技术,2001(3):21-23.
- [7] 张万兵,邵桂兰,宋晓东,等. 6 500 MV·A 冲击发电机结构特点[J].电工电气,2010(9):31-33.
- [8] 张亮,刘大鹏,邵桂兰,等. 大 中 容 量 短 路 试 验 发 电 机 主 要 设 计 特 点 [J].大 电 机 技 术,2011(3):28-31.
- [9] 黄实,李秉杰,张海峰,等. 4 000 kW/3 600RPM 双馈变频调速系统在 6 500 MV·A 短路发电机组中的应用[J].电气技术,2008(9):84-91.
- [10] 辜承林,陈乔夫,熊永前. 电机学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [11] YODA H, FUJITA M, NAKAMURA E, et al. The World's Largest Class 8 880 MV·A Short Circuit Generator[C].Power Engineering Society Summer Meeting 2002 IEEE, 2002.

作者简介:

汪海波(1983)男,浙江台州人,工程师,从事电力拖动与大容量试验室建设工作;

万德春(1974)男,湖北麻城人,高级工程师,从事电力系统自动化与电力设备试验方面的研究;

洪深(1962)男,安徽六安人,高级工程师,从事高压电器产品的大容量试验研究。

A Research on the Short Circuit Current Attenuation Characteristic of Short Circuit Generator with Large Capacity

WANG Hai-bo, WAN De-chun, HONG Shen

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper first briefly introduces the operational principals of short circuit generators. Then from the point of view of high-power laboratory, the attenuation characteristics of the short-circuit current of China-made 6 500 MV·A generator is studied and its MATLAB-based simulation mode is established. Based on the simulations of the attenuation characteristics of short-circuit current, the best choices of force excitation multiples to meet the requirements of relevant testing standards for three typical external impedance conditions are identified. The results of this paper provide a valuable reference for future operation of high-power laboratory.

Key words: short-circuit generator; short-circuit current; high-power laboratory; force excitation; simulation

(上接第 25 页)

针对目前风电场常用的 3 种接地方式,分析了不同方式下零序电流的产生原理,给出了相应的零序保护的计算方法。合理地整定汇集线路的零序定值、充分利用其保护功能,能有效避免风机脱网事故发生,从而保障电网运行安全。

参考文献:

- [1] 汤云岩,周巧俏,陈继军.小电流接地系统单相接地选线方法介绍[J].电工电气,2012(6):56-59.
- [2] 杨华,陈式献,涂斌.XHG 消弧柜在供电系统中应用的分析[J].江西冶金,2011,31(2):21-24.
- [3] 石启新.两种新型接地消弧消谐柜的性能比较分析[J].广西电力,2006(4):24-27.
- [4] 周一峰.一种单相接地引起消弧线圈事故分析[J].江苏电机工程,2010,29(5):16-17.

[5] 许凯.接地变的参数确定和保护计算[J].机电工程技术,2011,40(7):153-155

[6] 李玲,李国庆,王振浩.小电流接地系统 Z 型接地变压器模型设计[J].吉林电力,2006,184(3):24-27.

[7] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,2007.

作者简介:

向昌明(1965),男,江苏泰兴人,高级工程师,从事网源协调方面的研究工作;

杨宏宇(1979),男,河南上蔡人,工程师,从事继电保护整定计算与新能源应用的研究工作;

范立新(1966),男,安徽巢湖人,高级工程师,从事继电保护和新能源研究工作;

喻建(1987),男,江苏如东人,助理工程师,从事继电保护和电气试验方面的研究工作。

Grounding Mode and Zero Sequence Protection Setting Calculation of Wind Farm

XIANG Chang-ming, YANG Hong-yu, FAN Li-xin, YU Jian

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: A wind farm covers a vast area and the capacitive current of wind farms' assemble lines are relatively large. Therefore, the grounding modes of these assemble lines are critical to the safe operation of wind farms and the entire power grid. Three kinds of grounding modes, namely through harmonic elimination cabinet grounding, through extinction coil grounding and through resistance grounding, are analyzed. Based on the analysis a method for calculating the setting parameters of zero sequence protection system is presented which provides a valuable reference for future similar projects.

Key words: single-phase grounding; capacitance current; Z-type of grounding transformer; zero-sequence protection; setting calculation