

基于SPD与熔断器配合的风电机组雷电防护试验研究

从电涌保护器（SPD）与熔断器的特性分析出发，针对目前风电机组遭遇雷击事故频发的现象，为进一步减轻雷击对风电机组造成的过电压危害，设计了基于Ⅱ类SPD与熔断器配合保护的防雷防护试验方案。并对该方案进行了试验验证，试验结果表明该方案符合要求。

孙俊奇 任晓明/上海电机学院电气学院
王碧云/上海电器陶瓷厂有限公司

0 引言

研究风电机组的防雷，对风电机组的正常运行具有重要意义。文献[1]中主要说明了雷电可能会对风电机组造成系统性的破坏，并结合风电工程实例阐述了风电系统中的过电压保护及防雷接地的方案设计及其实现；文献[2]从雷电的破坏机理和形式入手，对雷电的防护区域进行了划分，提出了风电机组的防雷保护原则，对风电机组的防雷保护系统进行了全面的分析阐述；文献[3]介绍风力发电机组中电涌保护器（SPD）的重要作用 and 选用的原则，详细阐述SPD的安装模式、参数的选取和失效保护措施；文献[4]和文献[5]分析了风电机组过电压保护中的几个重点问题，综述了选用后备保护的基本要求，并介绍了保护断路装置、熔断器和断路器的特性以及分类配合试验验证的要求。上述文献中对风机易遭受雷电破坏作了充分的分析，对于风电机组的雷电保护提供了一定的依据，但却没有具体的实际配合方案提供。

本文根据中国国家标准化管理委员会2014年6月发布的《低压配电系统的电

涌保护器选择和使用导则》标准要求，提出了基于Ⅱ类SPD与熔断器的配合使用雷电防护方案，并利用冲击电流发生器（8/20 μ s，20 kA发生器）对Ⅱ类SPD与熔断器的配合特性进行了相应的试验，以验证针对相应产品提出的配合方案的可靠性。

1 采用熔断器和浪涌保护器配合保护的原因

风机的关键部位电气防雷示意图如图1所示。

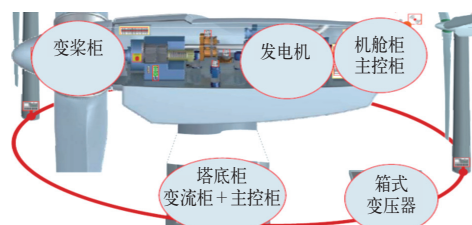


图1 风机防雷系统示意

以变流器网侧/机侧防雷保护方案为例，如图2所示。

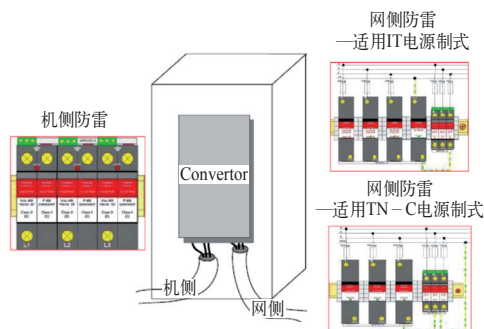


图2 变流器网侧/机侧防雷保护方案

其中，机侧防雷装置的适用电路为AC 400/690 V，最大持续工作电压 U_c （每相对地）为AC 800 V，额定放电电

关键词/Keywords

风电机组 ·
SPD ·
熔断器 ·
防雷保护 ·

流 I_n （每相对地）为15 kA，在额定放电电流条件下，残压 U_{res} （每相对地）为小于等于3 kA。

网侧防雷（适用IT电源制式）装置的适用电路为AC 400/690 V，最大持续工作电压 U_c （每相对地）为AC 750 V，额定放电电流 I_n （每相对地）为50 kA，在额定放电电流条件下，残压 U_{res} （每相对地）为小于等于4 kA，雷电放电电流 I_{imp} （每相对地）为50 kA，工频续流截断能力 I_f （每相对地）为50 kA。

网侧防雷（适用TN-C电源制式）装置的适用电路为AC 400/690 V，最大持续工作电压 U_c （每相对地）为AC 440 V，额定放电电流 I_n （每相对地）为50 kA，在额定放电电流条件下，残压 U_{res} （每相对地）为小于等于2.5 kA，雷电放电电流 I_{imp} （每相对地）为50 kA，工频续流截断能力 I_f （每相对地）为50 kA。

雷电防护方案中主要用SPD释放过电压。SPD是电力电子设备雷电防护中不可缺少的一种装置，SPD用于限制瞬态过电压和泄放电涌电流的电器，它至少包含一个非线性的元件。当设备遭遇瞬时过电压时，SPD呈低阻状态，可以释放过电压，将其残压控制在一定水平，保护设备不受雷击的干扰而导致财产损失。由于SPD（自带脱离器）中关键部件MOV等突然发生短路故障，脱离器来不及故障动作（即使动作也不能切断回路）。此时，需要添加后备保护装置，能迅速动作，切除故障的SPD。SPD的后备保护、熔断器和断路器都是可以采用的，但实践证明熔断器较之断路器更为适合。因此熔断器作为SPD的后备保护，两者之间参数的合理配置需要进一步研究。图3为熔断器与SPD配合测试示意图。

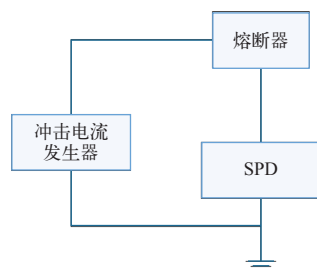


图3 熔断器与SPD连接示意图

2 SPD与熔断器的配合方案

2.1 SPD和熔断器的配合前提

对熔断器的冲击电流波形进行 I^2t 计算，计算结果与熔断器生产厂家提供的 I^2t （1 ms）比较，是推测熔断器单次电涌耐受能力的一种可能的方法。

对于Ⅱ类试验SPD，利用冲击电流的峰值能够估算出 I^2t ，在国家标准《低压电涌保护器（SPD）第12部分：低压配电系统的电涌保护器选择和使用导则》中给出了相应的简化参考公式，对于8/20波（8/20冲击电流，视在波前时间为8 μs，半峰值时间为20 μs的冲击电流），计算公式为： $I^2t = 14.01 \times I_{crest}^2$ ，利用该简化公式估算出冲击电流的 I^2t 。其中，冲击峰值电流 I_{crest} 单位为kA， I^2t 单位为 A^2s 。

为了耐受8/20波，20 kA 电涌冲击电流的单次冲击，后备保护熔断器必须有一个最小的弧前值，该值必须大于： $I^2t = 14.01 \times I_{crest}^2 = 5\ 604\ A^2s$ 。对于60 A和80 A的熔断器，熔断器生产厂家提供的典型弧前值分别为：7 500 A^2s 、14 500 A^2s 。因此可以选择试验用熔断器。

基于上述简化公式，容易推导出一个具有7 500 A^2s 的弧前值的新熔断器（额定值为60 A的熔断器）能够耐受的8/20波单次冲击电流为： $I_{crest} =$

$$\sqrt{\frac{7\ 500\ A^2s}{14.01s}} = 23.1\ kA。$$

一个具有14 500 A^2s 的弧前值的新熔断器（额定值为80 A的熔断器）能够耐受的8/20波单次冲击

$$\text{电流为：} I_{crest} = \sqrt{\frac{14\ 500\ A^2s}{14.01s}} = 32.2\ kA。$$

考虑到熔断器要耐受单次冲击，这些冲击能够降低熔断器的性能，从而降低了它们相对于单次冲击下的耐受能力。因此，为了能够通过所有的预处理试验，要在单次冲击耐受值的基础上乘以0.5~0.9的降低系数。

2.2 Ⅱ类SPD与熔断器的配合方案

熔断器需要与SPD进行配合试验，试验在进行中必须保证在相同的电流经过时，熔断器能保证

正常工作^[12]。

基于本文上述需要在单次冲击耐受值的基础上乘以降低系数,以及用 I^2t 进行计算并且与熔断器生产厂家提供的典型弧前值比较。因此,将Ⅱ类20 kA SPD产品配合用熔断器额定电流确定为80 A,其典型弧前值为14 500 A²s。依据国家标准,确定SPD与熔断器的配合保护试验方案。

SPD产品选用与冲击电流,熔断器额定电流的参数选择如表1所示。

表1 SPD与熔断器的配合方案

SPD产品类型	峰值/kA	所选熔断器额定电流/A
Ⅱ类产品	20	80

试验方案设计如下。

(1) 按SPD预处理试验方案对熔断器进行试验

选用型号NT00-80A熔断器,利用冲击电流发生器施加20 kA的8/20 μ s波形,15次冲击,5个一组,组内间隔时间1 min,每组间20~30 min。

试验目的:验证熔断器在同等条件下承受20 kA的电流冲击不会损坏,保证试验方案的可行性。

(2) SPD与熔断器配合试验方案

选用型号5SD7 474-0CC、5SD7 464-0CC的SPD,型号NT00-80A,施加20 kA的8/20 μ s波形,同时测量SPD两端的残压和整体残压。

3 熔断器冲击破坏试验

3.1 试验设备及方案

根据试验方案,首先选择型号NT00-80A的熔断器,然后在电流为20 kA的标准下,根据SPD预处理方案,冲击15次,5个冲击电流一组(间隔50~60 s),两组之间间隔25~30 min。

3.2 试验结果

熔断器NT00-80A在冲击电流20 kA时所得波形如图4所示。

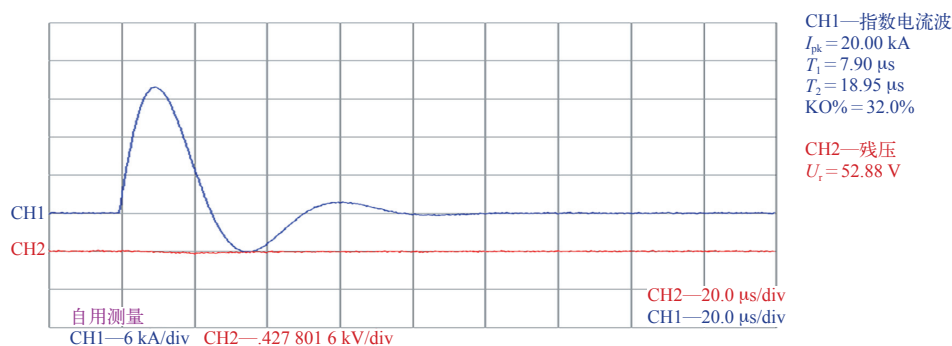


图4 熔断器NT00-80A在冲击电流20 kA时所得波形

熔断器NT00-80A破坏试验数据如表2~表4所示。

表2 熔断器NT00-80A破坏试验数据(第一组)

编号	冲击电流/kA	波头 T_1/μ s	波尾 T_2/μ s
1	19.95	8.9	20.41
2	20.96	8.6	20.14
3	20.20	8.9	20.17
4	23.58	7.9	19.43
5	23.58	8.2	19.78

型号为NT00-80A的熔断器在经过15次8/20 μ s的波的冲击后并未损坏,因此该熔断器可以和SPD配合使用。

表3 熔断器NT00-80A破坏试验数据(第二组)

编号	冲击电流/kA	波头 T_1/μ s	波尾 T_2/μ s
6	13.32	3.0	21.82
7	23.61	8.0	19.12
8	22.84	7.8	19.02
9	21.46	8.2	19.06
10	20.01	8.2	19.22

4 熔断器与SPD配合试验

4.1 试验设备及方案

方案1: 5SD7 474-0CC SPD + NT00-80A熔断器。

表4 熔断器NT00-80A 破坏试验数据 (第三组)

编号	冲击电流/kA	波头 $T_1/\mu\text{s}$	波尾 $T_2/\mu\text{s}$
11	20.00	7.9	18.95
12	19.96	8.0	19.04
13	20.22	8.0	19.04
14	19.73	7.9	19.11
15	20.00	7.9	18.95

方案2: 5SD7 464-0CC SPD + NT00-80A熔断器。

为了了解配合的效果, 还需要测量出20 kA冲击电流下不同型号的SPD与熔断器的整体残压及SPD两端的残压。熔断器与SPD试验连线如图5所示。



图5 熔断器与SPD现场的接线图

4.2 试验波形

(1) 5SD7 474-0CC SPD + NT00-80A熔断器配合试验

5SD7 474-0CC的SPD与80 A的熔断器配合试验波形如图6所示。

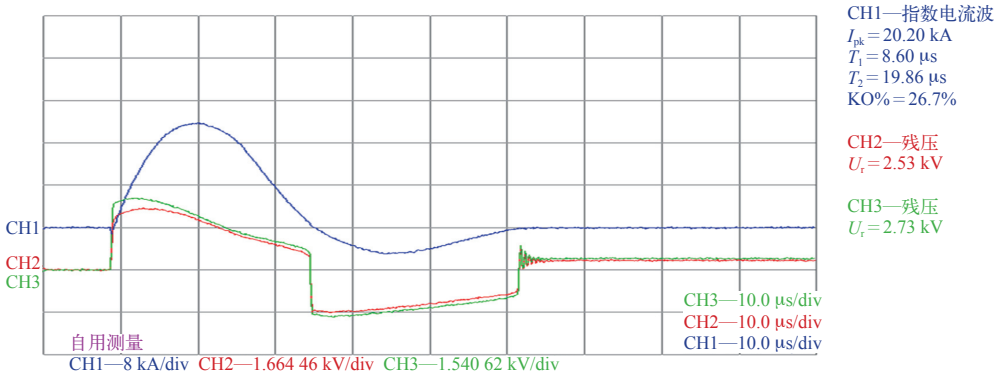


图6 5SD7 474-0CC的SPD与80 A的熔断器配合试验波形

5SD7 474-0CC的SPD与80 A的熔断器配合试验数据如表5所示。

表5 5SD7 474-0CC的SPD与80 A的熔断器配合试验数据

冲击电流 /kA	波头 T_1 / μs	波尾 T_2 / μs	整体残压 /kV	浪涌保护器 两端残压/kV
20.2	8.6	19.86	2.73	2.53

(2) 5SD7 464-0CC SPD + NT00-80A熔断器配合试验

5SD7 464-0CC的SPD与80 A的熔断器的配合试验波形如图7所示。

5SD7 464-0CC的SPD与80 A的熔断器的配合试验数据如表6所示。

由上述数据可见, 整体残压与浪涌保护器两端的残压之差为熔断器两端的残压, 由计算可得熔断器两端的残压均小于等于200 V, 对整个电路

表6 5SD7 464-0CC的SPD与80 A的熔断器的配合试验数据

冲击电流 /kA	波头 T_1 / μs	波尾 T_2 / μs	整体残压 /kV	浪涌保护器 两端残压/kV
20.84	8.10	19.13	2.12	1.73
18.01	9.55	20.15	2.26	1.85

的影响并不大。综上所述, II类SPD与80 A的熔断器的配合试验方案是可行的。

5 结束语

本次试验进行的是II类SPD与80 A的熔断器的配合试验, 验证了II类SPD与80 A熔断器的配合试验方案是可行的。试验结果表明, 该方案不但符合标准的要求, 也能符合试验要求。因此, 该方案可以被实际运用在要求标称值20 kA的风电机组的雷电防护。
(下转第79页)

- System Technology, Perth, 2000.
- [21] 汤蕴璆, 史乃. 电机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [22] Suwanwej W, Aunakorn. Estimation of short circuit current due to a group of induction motors using an aggregation model [C]. International conference on Power System Technology-POWERCON, Singapore, 2004.
- [23] Arif Karakas, Fangxing Li, Sarina Adhikari. Aggregation of multiple induction motors using MATLAB-based software package [C]. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Washington, 2009.
- [24] 黄守道, 邓建国, 罗德荣. 电机瞬态过程分析的MATLAB建模与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [25] 张洪宝, 王秀和, 仲慧. 三相异步电动机的MATLAB仿真研究 [J]. 电机技术, 2009 (4): 14-17.
- [26] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- (收稿日期: 2016-04-12) **EA**

(上接第56页)

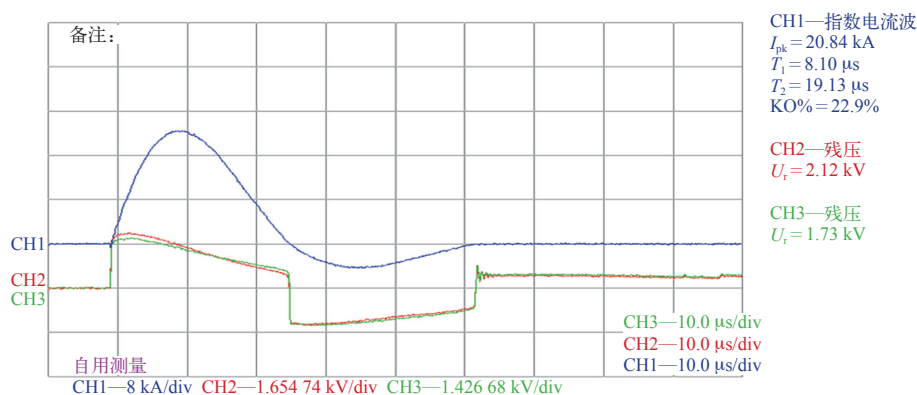


图7 5SD7 464-0CC的SPD与80 A的熔断器的配合试验波形

参考文献

- [1] 杨文斌, 周浩. 风电机组过电压保护与防雷接地设计 [J]. 高电压技术, 2008 (10): 2081-2085.
- [2] 王宝归, 曹国荣, 唐建平. 风电机组的防雷保护 [J]. 风能, 2012 (3).
- [3] 蔡睿, 史晓鸣. 风力发电机组防雷保护系统电涌保护器 (SPD) 的计算和选用 [J]. 能源与环境, 2010 (4): 68-69.
- [4] Vavra, Chris. Surge protection devices [J]. Consulting-Specifying Engineer, 2013 (6).
- [5] 孙丹峰, 季幼章. 电涌保护器 (SPD) 和保护断路装置的配合应用 [J]. 电源世界, 2015 (5): 38-41.
- [6] 毛柳明. 高压熔断器开断过电压研究 [M]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [7] 赵燕峰. 风电变频器熔断器选型研究 [J]. 变频器世界, 2015 (10): 38-41.
- [8] 张高龙. 浪涌保护器 (SPD) 的基本原理及应用 [J]. 电器工业, 2011 (3): 62-65.
- [9] 刘中平. 浪涌保护器的应用分析 [J]. 低压电器, 2009 (24): 33-36.
- [10] 姜中民, 刘磊, 宫翠凤. 关于电源SPD后备保护装置安装问题的分析 [J]. 现代建筑电气, 2011 (5): 59-61.
- [11] 黄鹏程, 李韦霖, 于瑞平, 等. 电涌保护器 (SPD) 在防雷工程中的应用分析 [J]. 甘肃科技, 2013 (22): 60-62.
- [12] 李润源. 浅谈电涌保护器 (SPD) 后备保护装置的选择 [J]. 电气时代, 2015 (8): 101-103.
- (收稿日期: 2016-02-15) **EA**