超星·期刊

第25卷第2期 华东交通大学学报 Vol. 25 No. 2
2008年4月 Journal of East China Jiaotong University Apr., 2008

文章编号: 1005 - 0523(2008)02 - 0047 - 04

分布式发电系统的防雷保护分析和研究

吴文辉

(华东交通大学 电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要: 分布式发电充分利用洁净新能源,是一种灵活高效的发电技术,分布式发电已经成为电力系统很重要的发展方向之一. 随着分布式发电系统规模和容量的增大以及分布式发电的并网运行,分布式发电系统的安全运行问题受到日益重视,在影响分布式发电系统安全运行的众多因素中,雷击是一个重要的因素. 结合配电网的防雷研究成果,对并网运行的分布式发电系统的雷击过程、雷击损坏机理以及相应的防雷保护措施进行了较全面的分析,设计了实用的分布式发电系统感应雷防护接线.

关 键 词: 分布式发电; 雷击; 保护; 配电网

中图分类号: TM863,TM61 文献标识码: A

以风力发电机、太阳能发电、燃料电池、微型燃气轮机等(功率一般小于50 MW)直接布置在配电网或分布在负荷附近的小型分散的电源为代表的分布式发电[1](Distributed Generation,以下简称DG)以其方便、高效、清洁的特点,引起世人的广泛关注,以其能有效地缓解用电的紧张形势,提高供电可靠性,具有较高的经济效益和社会效益等优点,在世界范围得到迅速的发展[2],《中华人民共和国可再生能源法》也于2006年1月1日起施行. 雷击破坏是导致DG非计划性停机的最大因素,雷击损坏致使DG设备的维修及更换费用高昂,停机时间导致了数以百万瓦计算的发电量的损失. 目前,关于DG的防雷保护,没有国际标准. 本文对并网运行的DG系统的雷击过程、雷击损坏机理以及相应的防雷保护措施进行分析.

1 直击雷防护

雷电直击于DG部件上,使DG部件因雷电产生的高温而燃烧,或DG部件体内的水分受热气化膨胀而产生强大的机械力,使物体遭到破坏. 一个直击雷防护系统包括: 接闪器、下引导体,接地系统和每个子系统的电涌保护器.

燃气轮机一般安装在厂房内,只需将金属结构接地即可,不需装设专门的直击雷保护装置. 太阳能光伏电池和燃料电池多安置在室外或旷野,防直击雷的主要措施是采用独立避雷针或避雷线. 若采用独立避雷针,光伏电池组件方阵、燃料电池及电站建筑物应在避雷针的保护范围内,国内多采用折线法,国外采用滚球法. 被保护物高度一般不超过5 m,燃料电池占地面积较小,易满足; 光伏电池组件方阵范围较大,避雷针高度可达24 ~ 30 m,甚至要采用两支或多支避雷针,应注意避免避雷针的投影落在光伏电池组件方阵上,在我国,最佳安装位置应在光伏电池组件方阵的北面,具体位置要综合考虑太阳能电站所处的纬度、光伏电池组件方阵的安装位置、建筑物的高度、大小等方面综合考虑[3].

在DG电源中,风力发电机是分散安置在旷野,尤其是风力发电机叶片高点(轮毂高度加风轮半径)较高,易受直接雷击,风力密度高能安装风力机

收稿日期: 2008 - 01 - 10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50577025); 华东交通大学科研基金项目(01305119)

作者简介: 吴文辉(1968 -),男,江西南丰人,工程硕士,副教授,从事电气工程及其自动化的教学和研究工作.

超星·期刊

的地方，多为中雷区和多雷区，其防直击雷形势严峻而又复杂.

目前的风机生产厂家已在风叶中安装导电的部分，能将雷击电流引导到轴心，以防止风叶内部产生弧光放电. 无叶尖阻尼器的叶片在叶尖部分的玻璃纤维外表面预置金属化物作为接闪器，并通过埋置于叶片内的 50 mm^2 铜导线与叶根处的铜导体法兰作良好连接; 有叶尖阻尼器的叶片通常是在叶尖部分的玻璃纤维中预置金属导体作为接闪器，通过由碳纤维材料制成的阻尼器轴与用于启动叶尖阻尼器的钢丝相连接[4].

一般情况下雷击叶片时产生的 80% 雷电流都将通过主轴承导入塔筒，通过轴承传导的强大雷电流通常会在轴承接触面上造成灼斑、引起振动和增大摩擦等，缩短轴承的使用寿命，转子转动时遭受雷击，损坏程度更大. 探究为雷电流搭建一条绕开轴承的分流路径是一种办法，分流路径实现之前可考虑在雷击可能发生时暂时关闭风力机以保护轴承.

现代大多数风力机的机舱罩是用金属板制成的，相当于一个法拉第罩，再在机舱罩后部设置高于风速计 1 m 的避雷针. 机舱罩及机舱内各部件均通过 50 mm^2 铜导线与机舱底板作连接，旋转部分的轮毂通过碳刷经塔筒内的接地线与机舱底板作连接，最后接入接地网形成雷电通道.

1.1 防雷击后的反击

光伏电池组件方阵、燃料电池，由于高度较低，避雷针与被保护物空气中距离不宜小于 5 m，地中距离不宜小于 3 m 即可.

风力机无论风轴、机舱、水平主轴、还是尾翼受到雷击，机舱内的发电机及控制系统等设备都可能受到机舱的高电位反击，在电源和控制回路沿塔柱引下的途中，也可能受到反击.

当雷击接闪器时，在 h 高度处 A 点将出现高电位 u_A(kV)[5]

$$u_A = iR_i + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中 i 为流过避雷针的雷电流，kA; R_i 为避雷针的冲击接地电阻，Ω; L——为被击物的等值电感，μH; $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 为雷电流的上升陡度，kA/μs. 取 i 为 200 kA，$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 为 200/2.6. h 为 40 m 处反击电压约为 2 138 kV，采用分流、均压、屏蔽、接地等技术后，发电机、励磁、保护、通信等部位反击电压仍高于耐压值很多倍，故各节点均应安装保护装置金属氧化物避雷器 MOA[6]，在风电机组遭受雷击的暂态过电压过程中，塔筒与传输线在不同位置的电位差是不同的，在传输线顶端和末端的电位差将在某时刻达到最大，约为塔筒顶端总雷电冲击电压幅值的 12% 左右; 各点达到电压最大值 U 的时间也是不同的，越接近于传输线末端达到电压最大值的时间越长[7]. 各点所选 MOA 的通流能力 $I = (U - U_r)/Z$(kA)，U_r 为电流 I 时的残压(kV); Z 为电流通过的回路的波阻，约为 150 Ω. 整个防直击雷系统能够将一个 200 kA 峰值电涌电流安全地分流.

1.2 防雷接地

良好的接地是保证雷击过程中 DG 安全的必备条件. 由于 DG 布置在山地且范围非常大，山地的土壤电阻率一般较高，需要建造一个围绕 DG 的环形地网. 为了降低接地电阻，首先要充分利用自然接地极，与所有接地电极、任何的地下金属物件(储存罐、管道等等) 以及建筑物原有的接地系统互相连接，大多数情况下单纯依靠自然接地极是不能满足要求的，需要增设人工接地装置，人工接地装置可水平敷设、垂直敷设以及既有水平又有垂直敷设的复合接地装置.

在土壤电阻率较高的岩石地区，为了减小接地电阻，可伸长接地极，主要是增加水平埋设的扁钢的长度. 由于冲击电流等值频率甚高，接地极自身的电感将会产生很大影响，伸长接地极在 30 m 的范围内效果好. 设计的目标为接地系统的接地电阻小于等于 10 Ω.

2 感应雷防护

DG 并网联接的 3 ~ 10 kV 配电网最易发生雷害事故，一份来自美国的数据表明: 2% 的损坏来自直击雷，98% 的损坏来自附近的交流供电线路及信号线路的感应雷.

采用普通变压器并网的 DG，应采用如图 1 所示的防雷保护接线，其 3 ~ 10 kV 侧避雷器 F_1 选用保护性能好的 MOA 来保护，并将构成变压器高压侧 MOA 的接地端点、低压绕组的中性点和变压器金属外壳三点联合接地，比如 10 kV 避雷器的残压为 44 ~ 50 kV，而变压器等传统高压设备能承受的瞬时过电压在 75 kV 左右[8]，大于避雷器的残压，用避雷器就能做到安全的防雷保护. 为了限制正、反变换过电压，靠近电源的变压器在低压侧装设一组避雷器. 低压侧避雷器 F_2 的接地端也应直接同变压器外壳连接后共同接地. 接地电阻尽量取较小值[9].

超星·期刊

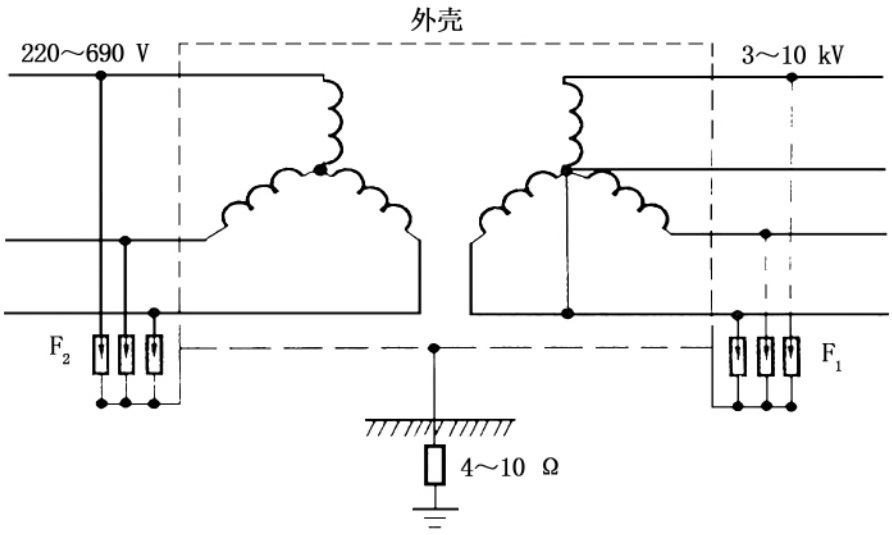

图 1　普通变压器并网的感应雷防护接线

燃料、光伏电池并网发电系统先是发出直流电能,再利用并网逆变器,将直流电转化为交流电馈送电网. 逆变器中使用大量的大功率电力电子器件,也称为电力电子变压器. 逆变器的电压裕度小,比如 10 kV 逆变器其能承受的瞬时过电压在 20 ~ 25 kV,可见雷电侵入波的防护要求更高,参考直配电机的防雷,如图 2 所示,保护线路耐雷水平可达到 50 kA. 其防雷保护的主要措施如下:

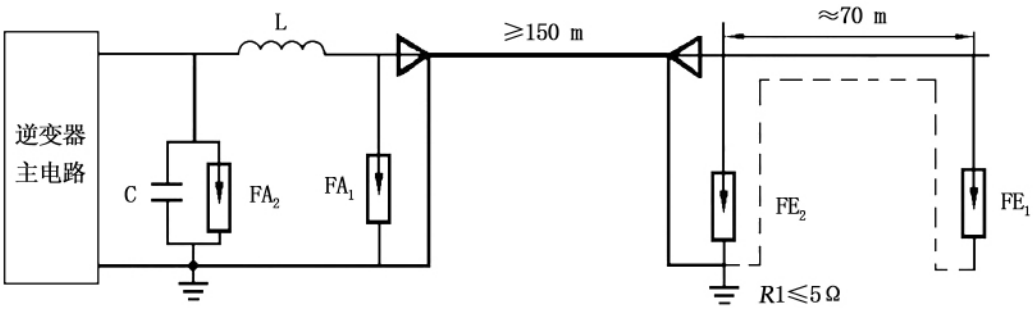

图 2　逆变器并网的感应雷防护接线

(1) 采用电缆段与排气式避雷器配合的进线段保护,它们联合作用以限制流经母线上避雷器中的雷电流幅值使之小于 3 kA.

(2) L 是逆变装置中为了限流而装设的电抗器,电感选取在 0.5 ~ 5 mH,L 前装一组避雷器 FA1,以保护电抗器和电缆终端.

(3) 逆变器并接的 3 ~ 10 kV 上装一组避雷器 FA_2,以限制侵入波幅值,取其 3 kA 下的残压与大功率电力电子器件的绝缘水平相配合,保护大功率电力电子器件.

(4) 在 3 ~ 10 kV 上装设一组并联电容器 C,包括电缆段电容在内一般每相电容应为 0.25 ~ 0.5 μF,构成的串联振荡周期为 70 ~ 222 μs,可以限制雷电侵入波的陡度 a 使之小于 0.35 kV/μs,同时可以降低感应雷过电压使之低于大功率电力电子器件冲击耐压强度. 逆变器主电路中如果是采用电容钳位的,一般不需要另外装设这组电容器.

雷直击于电缆首端的架空线路,排气式避雷器 FE_2 动作,电缆芯线与外皮经 FE_2 短接在一起,雷电流流过 FE_2 和接地电阻 R_1 所形成的电压 iR_1 同时作用在芯线和外皮上,沿着外皮将有电流 i_2 流向电机侧,于是在电缆外皮本身的电感 L_2 上出现压降 $L_2\frac{di_2}{dt}$,此压降是由环绕外皮的磁力线变化所造成的,这些磁力线也必然全部环绕芯线,在芯线上同时感应出一个大小等于 $L_2\frac{di_2}{dt}$ 的反电动势来,它将阻止雷电流从电缆首端沿芯线向逆变器流动,也即限制了流经避雷器 FA_2 的雷电流. 因电缆外皮末端的接地引下线总有电感 L_3 存在,iR_1 与 $L_2\frac{di_2}{dt}$ 之间有差值,差值越大,则流经芯线的电流越大. 在 FE_2 前 70 m 左右加装 FE_1,70 m 架空线的电感约为 $1.6\times70=110$ μH,来波首先作用在此电感上,使得 FE_1 端

超星·期刊

部的电压有所增高，易于使 FE_1 放电.

3 结束语

DG 防雷是系统工程，防雷系统的年度费用，不应该超过雷击破坏的年损失加上由雷击引起的修理等所导致的电能生产的损失，虽然目前 DG 发电量还只是总发电量的一小部分，只有全方位采取综合治理措施，才能有效防止 DG 系统雷害事故，提高 DG 系统安全运行水平，使 DG 得到更好的发展.

参考文献:

[1] Ackerman T, Anderson G, Seder L. Distributed generation: a definition [J]. Electric Power System Research, 2001, 57(6): 195 – 204.

[2] IEEE Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems [S]. IEEE Standard, 2001.

[3] 雷光辉. 偏远无电乡太阳能光伏电站防雷系统设计探讨[J]. 青海科技, 2003, (4): 33 – 35

[4] 赵海翔, 王晓蓉. 风电机组的雷击机理与防雷技术 [J]. 电网技术, 2003, 27(7): 12 – 15, 39

[5] 吴广宁. 高电压技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[7] 刘 继. 风力发电装置的雷电防护与电磁兼容问题 [EB/OL]. http://www.cma – lpinfo.gov.cn

[8] 赵海翔, 王晓蓉. 风电机组的雷击过电压分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(4): 27 – 29, 72

[9] 万 毅, 陆继明, 王 丹, 等. 高压大功率电力电子装置的防雷保护 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 76 – 78.

[10] 李景禄, 吴维宁, 杨廷方, 等. 配电网防雷保护的分析与研究 [J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 58 – 59.

Analysis of Lightning Protection for Distributed Generation System

WU Wen – hui

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Distributed generation, a new flexible and efficient generating skill, is the most important development in power system. With the increasing scale and capacity of distributed generation and integration of distributed generation, more attention is paid to the secure operation of distributed generation. Lightning stroke is an important one in the factors influencing the secure operation of distributed generation,. According to the research achievements of lightning protection for distribution network, the lightning stroke process and damage mechanism of distributed generation system and its lightning protection technology are analyzed here. A design of lightning protection for distributed generation is given.

Key words: distributed generation(DG); lightning; protection; distribution network

(责任编辑: 王建华)