

[风力发电]

风力发电机组与箱式变压器之间等电位连接研究

文/中国葛洲坝集团电力有限责任公司 潘 露 高鹏飞 李笑怡 范 磊 杨植民

风机与箱式变压器之间的连接电缆，各风机厂家均推荐采用四芯电缆，且要求非相线与箱式变压器低压侧中性点相连，此举对风机本身并无太大益处，但对箱式变压器却危害较大。结合风机及箱式变压器防雷整体概念，依据现有规范，提出了风机与箱式变压器之间等电位连接的正确做法。

近年来，由于电网建设相对滞后，我国能源需求增幅放缓，新能源发电方面，“三北”地区弃风、弃光问题较为严重。根据预测，“十三五”期间我国将积极化解过剩产能，将弃风、弃光率控制在合理水平。中部、南部山区风电目前基本不受弃风、弃光影响，开发力度将不受限制。

中部、南部风电场一般处于山区，海拔较高，所在地区雷暴日也较高。按照有关规定，平均年雷暴日数超过15 d但不超过40 d或地面落雷密度超过0.78次/km²a、但不超过2.78次/km²a的地区定义为中雷区；平均年雷暴日数超过40 d、但不超过90 d或地面落雷密度超过2.78次/km²a，但不超过7.98次/km²a的地区定义为多雷区；平均年雷暴日数超过90 d或地面落雷密度超过7.98次/km²a的地区定义为强雷区。中部、南部山区风电场一般都属于多雷区和强雷区，仅有较少地区位于中雷区。目前大多数风机轮毂高度超过80 m，风机叶片长度超过50 m，风机距离地面最大高度超过130 m比较常见，风电机组本身可等同避雷针，引雷效应比较明显，雷击后损失严重，故风电机组防雷尤为重要。各个风机厂家对防雷都较为重视，一般均将机组按最严酷等级进行防雷设计，参照IEC 62305—1：2010第八章的规定，采用的雷电防护水

平为LPL I的防护标准进行保护。

风机配套的箱式变压器，在国内一般布置在塔筒外面，根据设计强条要求，风机与带油箱式变压器间距离不应小于10 m。国内风电场用箱式变压器分为美式和欧式变压器，美式箱式变压器由于其较高的性价比，市场占有率远高于欧式箱式变压器，美式变压器采用的是油浸式变压器，故在大部分风电场，美式箱式变压器距离风机一般按中心距15 m（塔筒外廊与箱式变压器外廊净距约10 m左右）进行设计。箱式变压器位于风机下方，一般不会遭受直击雷。

风机与箱式变压器之间的连接有以下三个部分：①风机与箱式变压器共用一个接地网系统。②风机与箱式变压器之间采用动力电缆进行连接。③风机与箱式变压器之间连接用控制电缆或光缆。由于箱式变压器属于风电机组的配套设备，故：一般风电机组厂家会对箱式变压器及与箱式变压器的联络系统做出要求。并且由于风电行业发展较快，相关的规范标准未及时跟上，对此部分无详细要求，设计院一般会按风电机组厂家要求执行。在雷暴较高的地区，会出现较多风机、箱式变压器遭雷击损害事故，造成了严重的经济损失。

本文结合相关规范及部分风电场事故调查，

从防雷接地整体角度来分析风机与箱式变压器间连接部分的设计及应采取的方案,以期规范此部分的设计思路及具体施工措施,优化建设投资,提高后期运维的安全性、可靠性。

风力发电机组及箱式变压器防雷接地设计

风力发电机组一般采用包括外部雷电防护系统及内部雷电防护系统的综合雷电防护系统,主要包括雷电的截收和传导系统、屏蔽、等电位连接及电涌保护等措施。

风力发电机组外部雷电防护系统设计主要针对处于LPZ0A区的叶片及机舱设置接闪器及引下线系统。目前主流产品叶片引下线敷设在叶片内表面,采用截面积不小于 70 mm^2 的带绝缘层的阻燃铜电缆。主引下线、各分支引下线均为一根完整的电缆导体,三个叶片及机舱分别采用三根引下线沿塔筒内壁引下至塔筒底部基础均压环。

风力发电机组内部雷电防护系统设计主要针对处于除LPZ0A区外的区域安装浪涌保护系统、等电位接地系统和屏蔽保护系统。浪涌保护系统分多级设置,分别安放在不同防雷分区交界处,浪涌保护的接地端就近与局部等电位接地汇流排连接;为了减小各金属设备之间的电位差,机组的所有外露金属部分,在自然连接不能保证电气传导性连续的情况下,采用等电位连接措施。局部等电位接地汇流排通过等电位电缆汇集至总等电位接地排;屏蔽保护主要是防止雷电电磁对设备造成伤害,在LPZ0/LPZ1、LPZ1/LPZ2、LPZ2/LPZ3的边界处形成三层空间屏蔽,各空间屏蔽间做好等电位连接。机组管状钢塔架,可以视为第一层电磁屏蔽法拉第笼。

箱式变压器位于风电机组下方,处于LPZ0B区域的箱式变压器仅需考虑内部防雷系统设计,主要采取的措施为安装浪涌保护系统、等电位接地系统和屏蔽保护系统。在箱式变压器高低压侧及自用变低压侧分别装设浪涌保护器,箱式变压器低压侧中性点接地,故箱式变压器内部设置N排,与PE排一点连接并接地。

GB 51096—2015《风力发电场设计规范》规定,风力发电机组的工作接地、保护接地和雷电保护接地应共用一个总的接地装置,利用塔筒的钢筋混凝土基础作为其自然接地体,并同时敷设以水平接地极为主的环形人工接地网。箱式变压器单元设置以水平接地极为主的人工接地网,其

与风力发电机组的接地网连接点不少于2处,机组变电单元与接地网的连接点距离风力发电机组塔筒与地网的连接点,沿接地体的长度不应小于 15 m 。不得小于 15 m 的规定,主要是考虑雷击风力发电机组形成的反击雷电过电压沿接地极流动时有足够的衰减,以防反击电气设备。要求总的接地装置的工频接地电阻不超过 $4\ \Omega$ 。

目前大多风力发电机组的接闪器引下线直接接至总等电位接地排(塔筒底部基础均压环),然后通过3~4根 $60\text{ m}\times 6\text{ m}$ 的扁钢入地,与风力发电机组的接地网可靠连接。对风力发电机组本身而言,当被雷电击中后,引下线能快速将雷电流引入地下,塔筒内部电气设备的封闭外壳屏蔽大部分电磁干扰,浪涌保护器将感应电压限制在设备安全电压内,等电位系统将整个风电机组系统地电位同时抬高,金属设备间无电位差,整个系统安全可靠。箱式变压器主要受电磁干扰及感应电压影响,箱式变压器外壳起到电磁屏蔽作用,内部浪涌保护器及等电位系统保护设备安全。整个系统总体上防雷接地较为完善。

风力发电机组及箱式变压器生产厂家在产品设计中一般都考虑了自身产品所面临的雷电环境,针对性的进行了防护,各自产品相对完善。但是在整体设计上,尚缺乏经验,未充分考虑相互间的影响,在实际工程应用中造成了较多的事故。

联络动力电缆设计及施工

风机与箱式变压器之间的联络动力电缆为 0.69 kV 电缆,根据用途分为两个部分:一部分是动力电缆,连接风电机组控制柜和箱式变压器低压侧A、B、C三相,采用单芯或三芯电缆;由于三芯电缆敷设方便,目前主要采用三芯电缆。另一部分是连接塔筒底部等电位铜排与箱式变压器低压侧中性点的电缆。

目前多数风电机组厂家推荐联络电缆采用 n 根YJV22— $0.6/1\text{ kV}-3\times 240+120$ 四芯铠装电缆并联敷设。其中 120 mm^2 截面积的线芯电缆用于连接箱式变压器低压侧 690 V 中性点与风力发电机组总等电位接地排。由于箱式变压器低压侧中性点已经在箱式变压器内直接接地,并与风机及箱式变压器整体接地网连接,而风电机组控制柜侧 0.69 kV 的中性点是虚接地,即没有接地,故从风力发电机组总等电位铜排至箱式变压器低压侧中

性点的电缆只能定义为等电位电缆或PE线，而不能定义为N线或PEN线；根据GB 50217—2007规定，PE线的截面在相线截面积大于 800 mm^2 时，不应小于相线截面积的 $1/4$ 。因此，目前大部分设计院在进行上述电缆选择时，要么选择按照风机发电机组厂家的要求，采用四芯电缆，要么与风力发电机组厂家沟通，尽量节省材料，采用YJV22— $0.6/1\text{ kV}-3\times 240$ 三芯电缆外加两根独立的PE线，PE线采用铜芯电缆，截面积为 240 mm^2 。

在风力发电机组停机时，箱式变压器为供电设备，给风力发电机组辅助系统提供电源，此时 690 V 系统可以理解为不配中性导体的TT系统，电源侧中性点直接接地，风力发电机组内部的电气盘柜为受电侧，电气盘柜外壳直接通过PE线在机组内部接地，多数厂家或设计人员将其理解为TN—C系统是有误的，如果将其理解为TN—C系统，则从箱式变压器中性点接至风机的PE线应该接在配电柜的外壳上，且配电柜外壳不应单独接地。在风力发电机组发电时，箱式变压器为升压变压器，往系统输送电能。此时 690 V 系统可以理解为不配出N线的IT系统，受电侧设备（箱式变压器）外壳通过PE线就地接入地网。因此从理论分析上，如果将风力发电机组总等电位铜排至箱式变压器低压侧中性点的电缆理解为PE线是不合理的。

风力发电机组及箱式变压器内分别有各自的等电位系统及总等电位汇流排，两个设备间隔 15 m ，可以理解为两个独立的建构筑物，等电位接地系统一般是多级放射性设置，并经一点接地，两者之间没有必要通过等电位电缆再次连接。

通过以上分析，目前风力发电机组厂家要求的非相线芯电缆既不是PE线，也不是等电位连接线。同时，由于风力发电机组和箱式变压器共用一个地网，故此电缆理论上存在意义不大。但目前多数设计院按照风力发电机组厂家的要求或建议设计了此部分电缆。在雷电击中风力发电机组时，避雷引下线直接将雷电流引至风机塔筒内部的均压环（等电位铜排），然后入地，入地导体一般为三根 $60\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 扁钢，有效截面积为 $1\,080\text{ mm}^2$ 。箱式变压器中性点在箱式变压器区域直接接地，自风机均压环至箱式变压器中性点的两根铜芯电缆截面积为 240 mm^2 ，其等效为扁钢的截面积为 $2\,400\text{ mm}^2$ （如采用相线截面一半，则等效截面积更大）。当风机被雷电击中，雷电流泄放通道有两个：①叶片→均压环→扁钢→混凝土

基础→风机区域地网→整个地网；②叶片→均压环→两根铜缆→箱式变压器中性点→箱式变压器区域地网→整个地网。很明显，由于铜缆的有效截面更大，有较大一部分雷电流将从箱式变压器内部通过，并泄放到箱式变压器内部的地网中，对箱式变压器的安全运行产生严重威胁。雷电流通过箱式变压器低压室，如箱式变压器低压室屏蔽措施不良，则对低压室控制元器件产生严重损害。且雷电流未经衰减直接冲击箱式变压器低压室，如箱式变压器内部等电位系统不好，则极易引起间隙放电，危及箱式变压器安全运行。

GB/T 50065—2011中明确规定，发电厂和变电站配电装置构架上的避雷针的接地引下线应与接地网连接，并应在连接处加装集中接地装置，引下线与接地网的连接点至变压器接地导体与接地网连接点之间沿接地极的长度，不应小于 15 m 。由于非相芯电缆为 $0.6/1\text{ kV}$ 绝缘电缆，接在均压环上相当于引下线的延伸，直接将雷电流无衰减的引入变压器内部。显然此种做法与规范相悖。

根据以上分析，非相芯电缆无存在的必要意义，且在雷暴较高地区危害特别大，建议取消。

对于相芯电缆，由于采用穿管加直埋敷设方案，在穿管时极易发生电缆损伤，建议采用带铠电缆，铠装层应按规范分别接在风力发电机组的配电柜处的局部接地汇流排和箱式变压器接地汇流排两端接地。

联络控制电缆或光缆优化设计及施工措施

为便于风电场的运行管理，风力发电机组采用微机监控系统，该系统采用开放、分层分布式网络结构，整个系统分成站控层和间隔层。间隔层设备分布于风力发电机组塔架内，监控系统上位机安装于中央控制室内，设置监控后台机一套，通过通信光缆与间隔层设备联系，定时采集风力发电机组的各种运行数据，用来分析各风力发电机组的运行状态、设备状况等，同时对全场风力发电机组实行远方监控。通信主要采用地埋或架空光缆或OPGW，通过光分路器按集电线路回路数组成多个环网汇集上传至主控室风力发电机组微机监控系统，实现风力发电机组与风力发电机组微机监控系统的通信。

箱式变压器位于风力发电机组附近，目前其信号上传可通过两种方式上传：①箱式变压器采

用硬接线的方式将箱式变压器的信息通过控制电缆上传至风机侧PLC模块,然后通过风电场光缆上传至风机监控系统。②箱式变压器采用测控装置,通过智能监控单元配置网口或光纤接口接入风机塔基柜环网交换机,将箱式变压器的信息上传至升压站。即箱式变压器信号的上传要借助风力发电机组监控系统,采用控制电缆、光缆或网线接入风力发电机组的PLC或环网交换机。

如箱式变压器采用硬节点方式,油面温度采用模拟量信号,一般采用DJVP2VP2/22-0.3/0.5-4×2×1.0电缆;低压电流采用电流量信号,一般采用KVVP2/22-0.45/0.75-4×4电缆;低压开关状态、箱式变压器油温超温报警信号、箱式变压器油温超温跳闸信号、油位跳闸信号、压力释放信号、箱式变压器门开启信号、负荷开关分位和高压熔断器熔断等信号为开关量信号,一般采用KVVP2/22-0.45/0.75-10×2.5电缆。

根据DL/T 5136—2012《火力发电厂、变电站二次接线设计规程》控制电缆的屏蔽层要可靠接地;计算机监控系统的模拟信号回路控制电缆屏蔽层,不得构成两点或多点接地;应集中一点接地,对于双层屏蔽电缆,内屏蔽应一端接地,外屏蔽应两端接地。屏蔽电缆的屏蔽层应在开关场和控制室内两端接地。因此对于DJVP2VP2/22-0.3/0.5-4×2×1.0电缆,应将铠装层两端接地,铠装层与设备外壳连接接地,外屏蔽层通过截面积不小于4 mm²的铜绞线就近接至设备内部等电位接地排,内屏蔽层就近一点接至箱式变压器或风力发电机组设备内部等电位接地排。对于KVVP2/22-0.45/0.75电缆,应将铠装层两端接地,铠装层与设备外壳接地连接接地,屏蔽层通过截面积不小于4 mm²的铜绞线就近接至设备内部等电位接地排。

通过以上措施,电磁干扰对控制电缆信号回路干扰基本可以消除。控制电缆屏蔽层两端接地可能在690 V发生单相接地短路时,铠装层和屏蔽层存在短路电流分流功能,该分流足够大时可能烧毁二次电缆。不过在风电场中,由于动力电缆选型一般为铠装电缆,当电缆故障时,一般有铠装层回流,由于低压侧断路器配备有瞬时、短延时跳闸功能,铠装层厚度可以满足回流功能。如果短路点发生在风力发电机组的电缆接头处,短路电流会经配电柜接地排—总等电位汇流排、接地网—箱式变压器中性点回流主要短路电流。在动力电缆铠装层、控制电缆铠装层和屏蔽层上存

在较小的分流,不会对铠装层或屏蔽层造成实质性损失。在工程实际中,由于接地网施工为隐蔽工程,在施工过程中有不按规范执行的施工现象,存在风力发电机组接地网与箱式变压器接地网间连通性较差的情况,在这种情况下,铠装层分流会大大增加,可能对控制电缆屏蔽层造成伤害。另外,DL/T 5136—2012《火力发电厂、变电站二次接线设计规程》中提及,在火力发电厂或变电站中,沿二次电缆的沟道敷设截面积不小于100 mm²的裸铜排(线)构建室外的等电位接地网。此裸铜排一般沿控制电缆敷设,作为屏蔽层两点接地的配套措施,可将此并列分流导体看作屏蔽层的屏蔽,其作用是均衡地电位、分流地网电流和减少过电压。

基于此方面考虑,为了保证风机与箱式变压器地网的连通性及二次电缆的铠装接地的补充措施要求,可采用一根裸铜线,一端接风力发电机组PLC设备附近局部等电位接地排,一端接箱式变压器内部低压室等电位接地排。此导体必须为裸铜线,入地敷设(不能穿管敷设),铜线在地中长度不宜小于15 m,其敷设路径可与控制电缆路径基本一致,铜线截面积按100 mm²设置。

如箱式变压器采用箱式变压器测控装置,即采用通信光缆将箱式变压器测控信号接入风力发电机组的环网交换机,一般选择ADSS光缆穿保护管或带铠直埋型光缆。采用ADSS光缆不受雷电任何干扰,但必须穿管埋设,以保障光缆本身的安全。采用带铠直埋型直埋光缆由于其外部有铠装层,两端铠装层应在进入装置前将铠装层接地,否则在雷电发生时,铠装层将感应较高的电压,对设备放电而烧毁设备。目前风电场由于直埋型光缆铠装层施工不规范,造成光缆终端盒烧毁现象比比皆是。因此如采用光缆,推荐采用不带铠的ADSS光缆。

结束语

风机与箱式变压器之间电缆不应采用四芯电缆,也不应采用带绝缘的电缆作为PE线或等电位线将风力发电机组总等电位铜排接至箱式变压器低压侧中性点,此做法对箱式变压器的安全运行危害巨大,且造成了极大的材料浪费。本文从防雷接地、一次等电位及二次等电位角度分别对箱式变压器与风机之间的联络电缆或光缆的选择给出了详细的设计意见及具体措施。EA

(收稿日期:2018.02.27)

(编辑:朱金凤)