基于330 kV架空地线磁场感应耦合的巡检机器人电源研制

针对目前高压输电线路巡检机器人应用中的电源问题，提出采用架空地线磁场感应耦合的方式获取电能的方式，在对架空取电各种方式对比的基础上，计算了330 kV架空地线感应耦合取电损耗，对不同实际接地地线结构的安装分别进行了分析和论述，并对该技术的优势进行概述。最后介绍了电源系统的配置方案，经实际测试，效果良好。验证了架空地线磁场感应耦合取电的合理性和正确性。

樊海峰　杨明彬　张仲秋　唐永文／国网海南供电公司
李均龙／电子科技大学机械电子工程学院

樊海峰／高级工程师

关键词／Keywords
巡检机器人·
架空地线·
感应耦合·

0　引言

采用高压和超高压架空电力线是长距离输配电力的主要方式。随着我国经济的高速发展，超高压大容量输电线路越建越多，线路走廊穿越的地理环境更加复杂，如经过大面积的水库、湖泊和崇山峻岭等。电力线及杆塔附件长期暴露在野外，因受到持续的机械张力、电气闪络和材料老化的影响而产生断股、磨损和腐蚀等损伤，因此为保证其安全可靠的运行，定期检测与维护十分必要。传统的安全检查称为巡线，主要包括人力巡线、车辆巡线和直升飞机巡线。人力巡线效率低，劳动强度大，还受到大江、大河和高山等地理条件的限制；车辆巡线受地面交通的限制，很多地方无法实现车辆巡线；直升机巡线的费用较高，且很难达到需要的巡视准确度。目前多采用人力目测或借助望远镜观察完成巡线工作[1-2]。机器人技术的快速发展，为高压输电线路的巡线提供了新的途径。巡线机器人领域的研究在国外起步较早，20世纪80年代末开始。日本东京电力公司的Sawada等人[3]、美国TRC公司及加拿大魁北克水电研究院等先后开展了巡检机器人的研究；日本、加拿大和美国等发达国家先后开展了巡检机器人的研制工作，并取得了阶段性的成果，在两个杆塔之间巡检的机器人技术相对成熟，有些已达到产品化的程度。

在实际应用中，机器人的供电是一个关键问题，目前国内外的机器人都采用蓄电池供电，但蓄电池的充电及寿命问题影响了巡检机器人系统长期运行，并且蓄电池重量大、体积大，造成机器人自身非常重，从而给爬坡、移动等运动带来了较大的困难，同时能耗也非常高，给体积、成本及可靠性带来一系列的问题。而架空地线是高压输电线路结构的重要组成部分。线路正常送电时，架空地线中会受到三相电流的电磁感应而出现电流而增加线路功率损耗，由于导线通过交变电流在空间产生磁场，磁场切割两根防雷地线从而在地线上产生出感应电动势。目前对于330 kV线路，在条件允许的情况下一般都采用单点接地方案，主要是为了降低地线感应电能的损耗[4]。一旦采用逐塔接地，因为地线上有导线电流感应的电动势，势必会产生电流，从而出现电能损耗。因此，长期以来地线上的感应电一直被当成输电线路的负面影响看待。在实际应用中恰

横向课题：输电线路在线监测供电系统研发（2014008768）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

恰把这种一直视为损耗的地线感应电进行了有效的利用，使其成为输电线路巡检机器人的一个可靠供电途径[5-6]。

本文创新地提出将该地线电流通过感应方式用于巡检机器人的供电，将使得巡检机器人的体积和重量大为缩减，并针对330 kV防雷地线较为详细地论述了这种新型感应耦合电源设计。

1 330 kV防雷电线取电方式分析

从输电线获取能量的方式有电压耦合取电、电场感应取电和磁场感应取电三种[7-8]。①电压耦合取电最简单，而且输出功率也很大，只要在需要取电的地方安装高压互感器就可以解决，但是这种方案的施工成本和材料成本太高；②电场感应取电利用高压线路和大地间的分布电容获取电能，这种方式取电的成本也很低，但是获取的输出电流很小，几乎是微安级的，因此不适用于较大功率的设备使用；③采用磁场感应取电，根据麦克斯韦原理，导线上流过交变电流时会在空间产生交变磁场，而该交变磁场切割由两根防雷地线和铁塔组成的空间闭合平面时会在该平面上产生出感应电动势，一旦该平面的导电体形成环路则会在该平面上形成感应环流，如图1所示。这种方案是交流电流在线路周边产生的50 Hz交变磁场，利用电磁感应原理通过耦合线圈获取能量，利用这种方法可以产生较大的能量输出，而且电流耦合线圈的成本很低有利于推广应用。

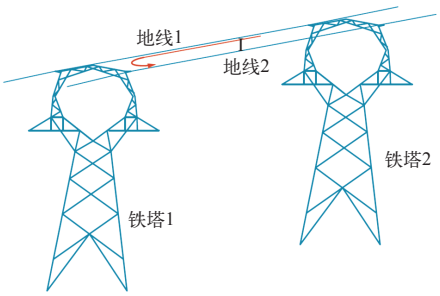


图1 地线感应电流示意图

磁场感应取电利用的是交流电流在线路周边产生的50 Hz交变磁场，当线路上的电流较小时，其产生的磁场也较小，在线圈一定的情况下其感应出的功率也就较小，反之线路上的电流较大时，其感应输出的功率就会加大。因此磁场感应取电可以在高压端进行，但是考虑到高压安装的绝缘、安装难度、能量输出及将来的维护等因素，在高压侧取电的应用面较为狭窄，并且不便于能量的输出，而通过母线在地线环路中感应出的能量则对绝缘、安装的要求不高，并且能量可以输出，将来的维护较为简单。

2 330 kV防雷地线磁场感应耦合取电损耗计算

330 kV线路当在母线电流为436 A时，1 km地线环路做的地线感应电损耗计算如下。

1）单位公里地线环路的感应电动势

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{M}} &= \mathrm{j}0.145I_{\mathrm{a}}\left(a\lg\frac{d_{1\mathrm{a}}}{d_{1\mathrm{b}}}+a^2\lg\frac{d_{1\mathrm{a}}}{d_{1\mathrm{c}}}-a\lg\frac{d_{1\mathrm{c}}}{d_{1\mathrm{b}}}-a^2\lg\frac{d_{1\mathrm{c}}}{d_{1\mathrm{a}}}\right)\\ &= \mathrm{j}0.145I_{\mathrm{a}}\left(a\lg\frac{d_{1\mathrm{a}}}{d_{1\mathrm{c}}}+2a^2\lg\frac{d_{1\mathrm{a}}}{d_{1\mathrm{c}}}\right)\\ &= \mathrm{j}0.145I_{\mathrm{a}}\lg\frac{d_{1\mathrm{a}}}{d_{1\mathrm{c}}}(a+2a^2)\end{aligned} \tag{1}$$

式中，转角因子$a=\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}$，$|a+2a^2|=\sqrt{3}$；$I_{\mathrm{a}}$为导线电流；$d_{1\mathrm{a}}$、$d_{1\mathrm{b}}$、$d_{1\mathrm{c}}$为1#地线与输电线间距。

2）地线环路单位公里感应电动势的模

$$\begin{aligned}\left|E_{\mathrm{M}}\right| &= \sqrt{3}\left(\mathrm{j}0.145I_{\mathrm{a}}\times\lg\frac{d_{1\mathrm{a}}}{d_{1\mathrm{c}}}\right)\\ &= \sqrt{3}\times0.145\times436\times\lg\frac{6.21}{13.9}\ \mathrm{V}=38.32\ \mathrm{V}\end{aligned} \tag{2}$$

3）地线环路单位公里自阻抗为

$$\begin{aligned}Z_{11} &= R+\mathrm{j}X_{\mathrm{in}}+\mathrm{j}0.145\lg\frac{d_{12}}{r}\\ &= 1.7+\mathrm{j}0.21+\mathrm{j}0.145\lg\frac{11}{0.005\,5}\\ &= 1.7+\mathrm{j}0.688\\ &= 1.83^{\angle21^\circ}\end{aligned} \tag{3}$$

式中，$R+\mathrm{j}X_{\mathrm{in}}$为单根地线自阻抗；$\mathrm{j}0.145\lg(d_{12}/r)$地线间互阻抗，Ω；$d_{12}$为地线间距，m；$r$为地线等效半径，m。

4）地线环流计算

$$I_{\mathrm{M}}=\frac{E_{\mathrm{M}}}{2Z_{11}}=\frac{38.32}{3.66}\ \mathrm{A}=10.46\ \mathrm{A} \tag{4}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5）单位公里损耗

$$P = 2I^2R_i = 2\times10.46^2\times1.7\ \mathrm{W} = 372\ \mathrm{W} \quad (5)$$

从上述计算结果可以看出，在该例中母线电流为436 A时，地线上每公里的单位损耗是372 W，如果设计的电源和地线阻抗达到匹配状态，则在该线路状态下最大可以获得50%的功率为186 W。而母线电流为150 A时，可获得功率22 W的输出功率。

上述分析只是理论计算，而在实际使用时和输电地线的内阻很难做到完全匹配，所以实际能取出的功率应该要小。通过实验室模拟测试，在同样内阻条件下通过变压器接在该地线上，所能取出的功率为该地线所能提供最大功率的10%～20%。通过地线耦合取电可以取出数瓦到几十瓦的输出功率，可以满足大多数的输电线路在线监测装置的用电需求。以上对330 kV防雷地线从理论方面进行分析，但具体到现场如何实现电能的获取仍然是一个问题。

3 330 kV防雷地线磁场感应耦合电源接地系统结构设计

目前110 kV及其以上的交流输电线路其地线的构架主要分为逐塔接地地线、不带OPGW的单点接地地线、带OPGW的单点接地地线、带OPGW的两点接地地线和不带OPGW的两点接地地线[9-10]。下面就地线耦合取电电源系统在上述几种地线结构下如何安装才能取出功率进行分析。

3.1 逐塔接地地线

其地线构架图如图2所示，电源设备的安装方式如图3所示。

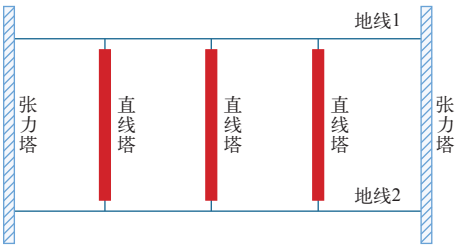


图2 地线构架图

由图2和图3可以看到，对于逐塔接地的地线

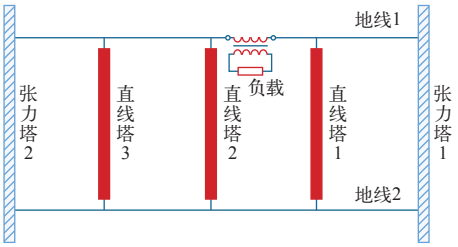


图3 电源设备的安装方式

系统，想要取出电能需要把电源系统串接到地线中，这时电源所取的是由直线塔1、地线1、耦合取电系统、直线塔2和地线2所构成环路的电动势和电流。这种串入接法很明显会改变现有地线的结构。

3.2 不带OPGW的单点接地地线

其地线构架图如图4所示，电源设备的安装方式如图5所示。

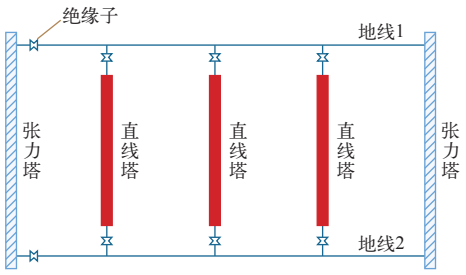


图4 地线构架图

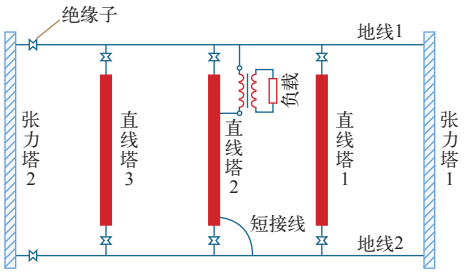


图5 电源设备的安装方式

在上图中，由地线2、张力塔1、地线1、耦合取电系统、直线塔2和短接线构成一个环路，取电系统通过这个环路产生的电动势和电流获取功率。在这种结构中，地线的主体机构没有被改变。

3.3 带OPGW的单点接地地线

取能设备安装如图6所示，其取电方式和图5类似，但不需要外接短接线，其对原有线路的影

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

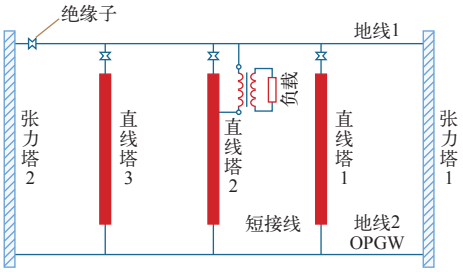


图6 电能设备的安装方式

响更小。

3.4 带OPGW的两点接地地线

取能设备安装如图7所示。

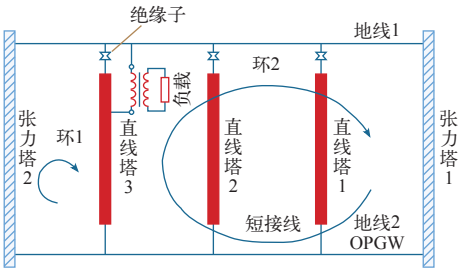


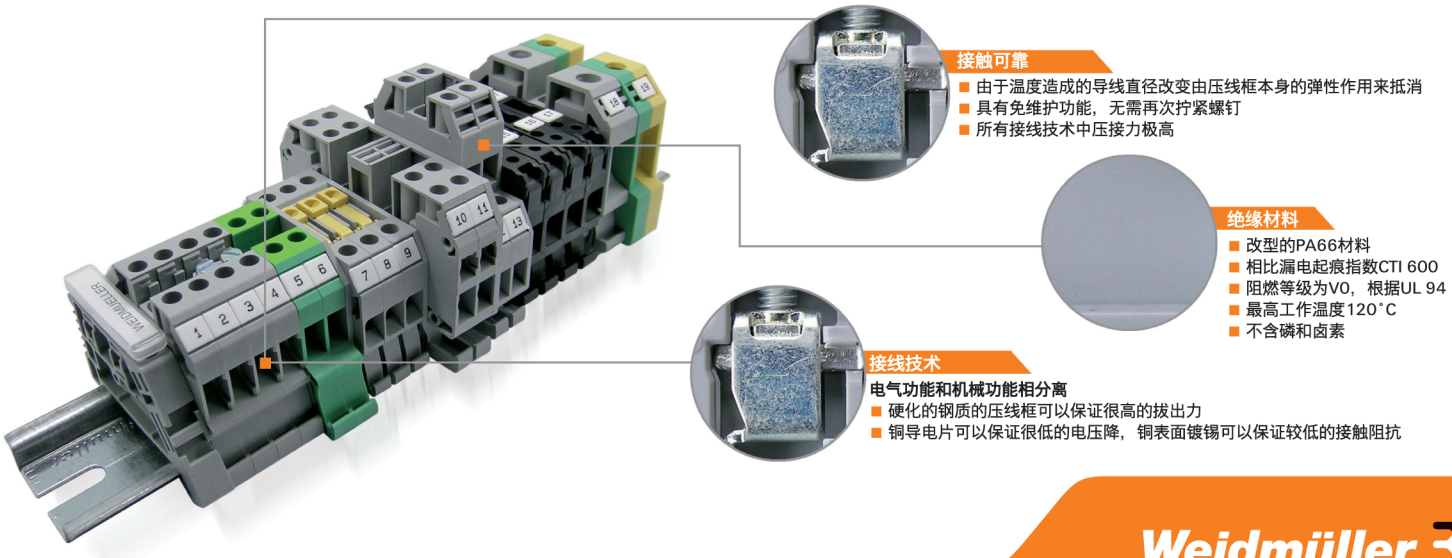
图7 电能设备的安装方式

从两点接地地线系统取电的原理和前面几种方式有所不同，电源所取出的电能是由张力塔2、地线1、地线2、直线塔3和耦合电源所组成的“环1”与由直线塔3，耦合电源、地线1、张力塔1和地线2所组成的“环2”相互抵消掉以后所剩余的能量。不带OPGW的两点接地地线构架的取电原理和图7类似。

通过对以上几种地线结构对取能的要求可以看出，对于单点接地的地线构架最适合于地线耦合取电电源的安装、两点接地系统在电源安装时考虑的方面要多一些，但这两种地线结构在安装取电电源时基本上不需要改变现有地线构架，而对于逐塔接地地线则需要串入地线网络中。因此，对于采用TV方式取能的地线耦合取电系统更适合于用在单点接地系统。

4 地线磁场感应耦合电源的优势

目前输电线巡线机器人监测系统所采用的供



Weidmüller

魏德米勒SAKDU系列接线端子
— 卓越品质与高性价比的完美结合

魏德米勒SAK系列接线端子经过60多年的市场考验，已经成为了接线技术、可靠联接及产品种类丰富的代名词。SAKDU系列正是在这一经典系列的基础上进行产品优化和技术突破，满足了联接技术市场对产品不断升级及高性价比的要求。

扫一扫，关注魏德米勒官方微信

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21 22196006 网址: www.weidmueller.com.cn

Let's connect.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电模式均为“光伏板＋蓄电池”。但是光伏电源具有以下缺点。

1）光伏板大电流充电缩短蓄电池寿命。由于太阳能供电属于间歇性供电，因此为了保证在长时间光能不足的情况下监测设备能满足7×24 h的工作要求，所采用的蓄电池容量都很大（100～200 A·h），为了在短时间内把电池充满一般都会采用大电流充电，而经常性的大电流充电会造成蓄电池寿命的缩短。

2）长时间阴雨天气可能导致充电控制器无法起动。目前所有的充电控制器都是由蓄电池供电，当蓄电池电压低于7 V，充电控制器就会停止工作，在秋冬季节长时间阴天和光伏板覆冰、覆雪等光照不足的情况下，蓄电池电能将耗尽，即便过后光照充足充电控制器也无法为蓄电池充电。

3）覆尘降低了光伏板取电效率。光伏板长期暴露在野外，表面覆尘越积越厚，将导致光伏板取电效率逐步降低，造成蓄电池长期欠充，一旦遇到长时间阴天或雪覆冰，更易出现2）所述问题。基于以上三方面原因，仅靠光伏板难以保证监测装置的长期可靠工作。

地线磁场感应耦合电源通过架空地线网络从输电导线上抽取电能。只要输电线路上有适量电流流过，就可以从架空地线上获取能量。因此，对于那些常年都有一定负荷的线路可以持续地从线路中获取能量，这就大大降低对中间储能组件的需求。可以选用寿命更长、使用更为方便但容量比蓄电池低的储能部件（如超级电容）作为能量缓冲池。其地位就从主要供能部件变为功率调节部件，其作用也从需要持续放电变为了瞬时功率调节，从而大大降低了电源系统对储能设备的依赖，使得电源系统的维护周期从现在的6～12个月延长到3年以上，电源可靠工作时间大幅提高。此外，由于地线磁场感应耦合电源的供电持续性，其在对外供电时可以采用较小的输出电流，在这种情况下，即使后端仍然采用蓄电池作为能量缓冲池，由于是小电流持续充电，蓄电池的寿命会大大增加。光伏电源和地线磁场感应耦合电源性能对比，如下表所示。

表　光伏电源和地线磁场感应耦合电源性能对比

对比指标	光伏电源	地线磁场感应耦合电源
安装位置	铁塔	铁塔
供电模式	间歇	持续
储能要求	蓄电池	超级电容、蓄电池
是否受外界环境影响	是	否
维护成本	高	低
使用寿命	短	长
电源重量	重	轻

电源系统在实际使用中可以根据不同的现场要求采用不同的配置方案。

1）地线磁场感应耦合电源＋超级电容。该方案优点是电源重量轻、使用寿命长、不需要更换蓄电池且维护成本低；不足是在线路低负荷时只能采用“充电－放电”的间歇性工作模式，电源自身储能能力不高。

2）地线磁场感应耦合电源＋蓄电池。该方案适用于大部分应用场景。其优点是蓄电池储能能力强，在线路负荷不足时蓄电池可以提供较长的持续供电能力，并且对于具有加热要求的设备能在较长时间内向其提供较大的功率。该方案对于现有的在线监测设备电源进行替换时十分方便，只需要去掉光伏板然后接入地线取电电源即可。在这种方案中由于地线磁场感应耦合电源是一种可持续供电的电源，所需蓄电池的容量可以大幅减小，一般情况下可以从现有的100～200 A·h减小为20～30 A·h，并且蓄电池的寿命会远远大于单独使用光伏板的情况。

3）地线磁场感应耦合电源＋光伏板＋蓄电池。在该配置方案下巡线机器人监测系统的电源同时采用光伏板和地线感应电源，两者互为补充，能满足大部分现场应用。

5　结束语

本文对330 kV防雷地线如何采用磁场感应取电技术进行了理论和应用方面的论述，阐述了磁场感应取电的原理，进行了电能损耗的计算，并对实际应用的不同接地系统结构采用不同的接入方式进行了介绍。最后提出感应取电电源的优

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

势，表明此技术在未来发展中将有重大的应用前景。该成果已经产品化，在实际应用中取得了很好的效果。

参考文献

[1] DLT 5092—1999 110～500 kV架空送电线路设计技术规程 [S]．北京：中国电力出版社，1999．

[2] 曾林平，张鹏，冯玉昌，等．750 kV线路架空地线感应电压和感应电流仿真计算 [J]．电网与清洁能源，2008，24 (6)．

[3] Sawada J，Kusumoto K，Munakata T．A mobile robot for inspection of power transmission lines [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1991，6 (1)：309-315．

[4] Montambault S，Pouliot N．The HQ LineROVer：contributing to innovation in transmission line maintenance [C]．Proceedings of 2003 IEEE ESMO-IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction Operation and Live-Line Maintenance，2003：33-40．

[5] 国家电力公司东北电力设计院．电力工程高压送电线路设计手册 [M]．2版．中国电力出版社，2004．

[6] 张运楚，梁自泽，谭民．架空电力线路巡线机器人的研究综述 [J]．机器人，2004，26 (5)：467-473．

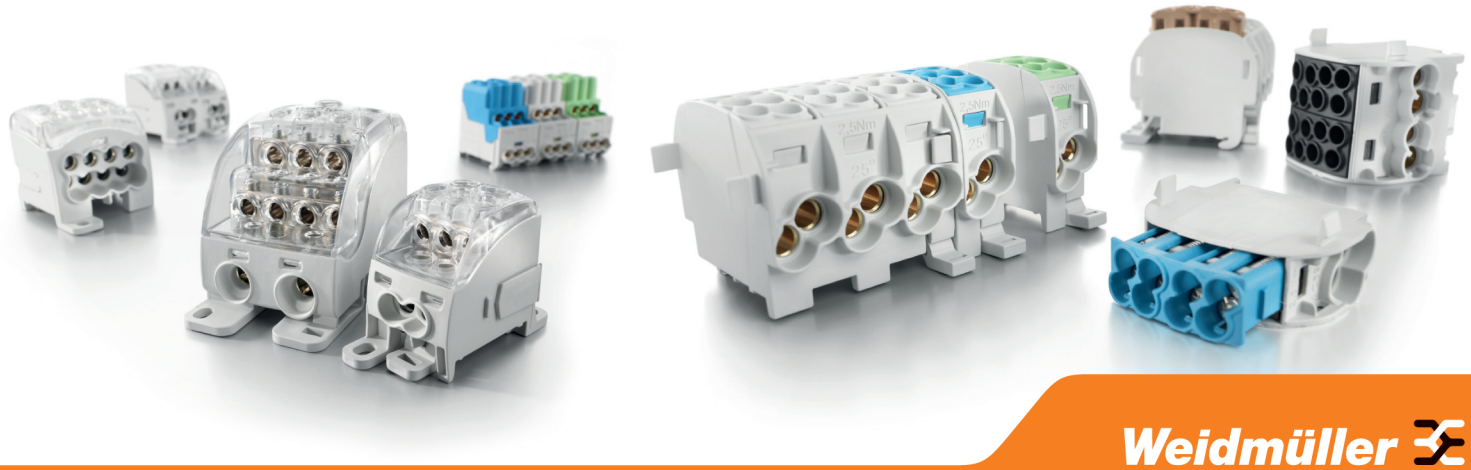
[7] 李维峰，付兴伟，白玉成，等．输电线路感应取电电源装置的研究与开发 [J]．武汉大学学报：工学版，2011，44 (4)：516-520．

[8] 骆一萍，曾翔君，雷永平，等．基于放电法的高压电场感应取能技术 [J]．电力系统自动化，2015，39 (8)：113-118．

[9] 陈超，廖民传．OPGW多种接地方式综合分析 [J]．四川电力技术，2013，36 (5)：73-78．

[10] 彭向阳，毛先胤，胡卫，等．输电线路架空地线节能接地技术 [J]．电力建设，2014，35 (8)：84-90．

（收稿日期：2015－07－22）EA



Weidmüller

魏德米勒WPD系列分线端子
为电力分配提供安全、高效的解决方案

魏德米勒新推出了WPD系列分线端子，包括主回路分线端子、次回路分线端子和相位分线端子。魏德米勒WPD X01-X03主回路分线端子空间紧凑，根据IEC61238"A级"标准测试，可以安全地联接铝导线，电压等级可以达到交直流1000V，满足各种应用的电压需求；次回路分线端子和相位分线端子WPD X00和WPD X04-X09，提供了空间紧凑以及安全有效的电源分配，台阶式的进线孔设计使得布线清晰简便，满足客户实际应用中的高标准需求。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

扫一扫，关注魏德米勒官方微信

Let's connect.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net