输电线路分段地线感应取能方法研究

毛先胤[1],马晓红[1],彭 赤[2],代 州[1],杨 军[3]
(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院,贵州 贵阳 550002;
2. 贵州电网有限责任公司,贵州 贵阳 550002;3. 电子科技大学 机械与电气工程学院,四川 成都 611731)

摘要:利用导地互感公式推导了不同相线电流情况下地线损耗功率,在此基础上提出了一种可应用于分段地线网络的地线取能方法,并基于所提方法设计了取能设备。该取电装置具有输入动态范围大、转换效率高、抗干扰能力强的特点。在导线负荷满足要求的情况下该装置可以替代光伏电源实现对在线监测设备的稳定供电。

关键词:输电线路;地线取能;电磁感应;稳压电路
中图分类号:TM 72 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.035

0 引言

目前,国内安装在高压输电线路上的在线监测设备(以下简称为在线监测设备)主要采用光能[1]、风能[2]和基于相电流的电磁感应取能[3-6]方法进行供电。其中,基于相电流的电磁感应取能方法因为安全的原因只能对安装在高压导线上的在线监测设备进行供电,而对于大多数安装在铁塔上的在线监测设备目前主要采用光能或风光互补供电。风、光供电方式受环境影响较大,在冬季常常因为长时间的阴、雨、雪等气候造成在线监测设备因供电不足而无法稳定工作的问题。

为了解决上述问题,近年来地线取能技术[7-9]逐渐成为新的研究热点。文献[10-11]提出了基于电场感应(静电感应)原理的地线取能方法,该方法要求用于取电的地线完全浮空,而国内极少有地线采用完全浮空架构,因此该方法没有推广使用价值。文献[12]分析了在磁场感应条件下地线网络的等效模型及感应电大小,但没有提出具体的取能方法。

本文在地线感应电理论分析的基础上,设计了一种适用于具有分段接地架构的地线取能设备。该设备具有输入动态范围大、整机效率高、安全性高的特点,其从输电线路的地线中所取出的能量能够满足目前国内大多数在线监测设备的用电要求,并成功应用于 220~750 kV 电压等级的线路。

1 地线感应电分析及取能的实现

实现可靠的架空地线取能需要解决以下问题:架空地线自身能从相线中通过电磁感应获取多少能量;采用何种方法能从现有的架空地线网络中取能;当因雷电、相线电流变化、操作过电压等原因造成地线电压或电流剧烈波动时,地线取能设备如何实现对内部电路的保护。

收稿日期:2018-02-10;**修回日期**:2018-12-12
基金项目:贵州电网有限责任公司科技项目(GZ2015-3-0024)
Project supported by the Science and Technology Program of Guizhou Power Grid Co.,Ltd.(GZ2015-3-0024)

1.1 架空地线感应电及地线损耗功率分析

从地线中取出的能量和地线自身的感应电损耗密切相关,而地线感应电损耗又受到相线电流、导/地线位置和地线阻抗等因素的影响。下面以贵州 220 kV 索干线为例,计算在 1 km 地线环路上地线感应电损耗的大小。本文选用该线路中较为典型的杆塔 ZB2 进行计算分析,该塔形的地线和导线的相对位置如图 1 所示。

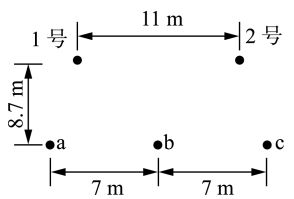


图 1 地线和导线相对位置

Fig.1 Relative position of ground wire and conductor

根据导地线互感公式可以推导得到 1 km 地线环路的感应电势为[13]:

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

其中,转角因子 $a=\mathrm{e}^{\mathrm{j}120^\circ}$,$|a+2a^2|\approx1.732$;$I_{\mathrm{a}}$ 为导线电流;$d_{1\mathrm{a}}$、$d_{1\mathrm{b}}$、$d_{1\mathrm{c}}$为 1 号地线与输电线的距离。

1 km 地线环路的自阻抗为:

$$Z_{11}=R+\mathrm{j}X_{\mathrm{in}}+\mathrm{j}0.145\lg\frac{d_{12}}{r} \tag{2}$$

其中,$R+\mathrm{j}X_{\mathrm{in}}$为单根地线自阻抗,$R$ 为单根地线电阻,

X_{in}为单根地线感抗(单位为Ω/km);j0.145lg(d_{12}/r)为地线间互阻抗(单位为Ω),d_{12}为1、2号地线间的距离(单位为m),r为地线等效半径(单位为m)。

则地线环流为:

$$I=E_M/(2Z_{11}) \tag{3}$$

单位长度地线上的损耗功率为:

$$P=2I^2R \tag{4}$$

根据地线型号可知,该线路地线直流电阻R=1.954 Ω/km、感抗X_{in}=0.21 Ω/km,则由式(1)—(4)可计算得到不同相线电流下,不同长度地线的损耗功率如表1所示。

表1 不同相线电流下,不同长度地线的损耗功率

Table 1 Loss of ground wire with different length under different line currents

地线长度/km	地线损耗/W				
	100 A	200 A	300 A	400 A	500 A
1	7.2	28.9	65.1	115.6	180.7
2	14.4	57.8	130.1	231.3	361.5
3	21.7	86.7	195.2	347.0	542.2
4	28.9	115.7	260.2	462.7	722.9
5	36.1	144.6	325.3	578.3	903.7

由表1的数据可见,相线电流越大、地线长度越长,地线损耗越大。目前,国内大多数在线监测设备的平均功率一般为5~15 W,因此只要采用合适的方法从地线损耗功率中取出部分功率就可以满足在线监测设备的运行需要。

1.2 地线取能方法的实现

地线取能方法的选取应遵循"尽可能小地改变地线现有架构"和"取出的功率足够大"这2个原则。基于上述原则,可以利用分段接地地线架构中架空地线和铁塔间的电位差,采用电压取能的方法从地线中获取能量。电压取能法的接入方式如图2所示。

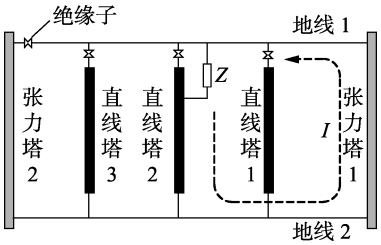


图2 取能设备接入的典型方式

Fig.2 Typical access mode of draw-out power equipment

图2中,地线1在该耐张段内只在张力塔1和铁塔、其他铁塔和地线间加装了绝缘子。此时,其他铁塔和地线之间存在感应电动势E,如式(5)所示。

$$E=E_ML \tag{5}$$

其中,L为该地线接地点到所测量铁塔的距离,单位为km。

如果将地线取能设备看作是负载Z,并按图2接入地线网络中,则地线1、负载Z、直线塔2、地线2、张力塔1即构成1个闭合环路,且在此环路中存在环路电流I。由式(5)可计算出索干线在分段接地条件下,不同绝缘长度下的相线电流和感应电压间的关系,如表2所示。

表2 相线电流和地线长度对应的感应电压

Table 2 Relationship between induced voltage and line current

绝缘长度/km	感应电压/V				
	100 A	200 A	300 A	400 A	500 A
1	5.94	11.88	17.82	23.76	29.7
2	11.88	23.76	35.64	47.52	59.4
3	17.82	35.64	53.46	71.28	89.1
4	23.76	47.52	71.28	95.04	118.8
5	29.70	59.40	89.10	118.80	148.5

图2所示的接入方式的等效电路如图3所示。图中,U_s为地线感应电动势;R_0为取能设备电阻。

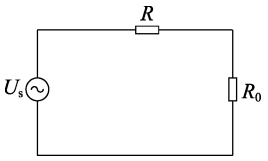


图3 图2的等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of Fig.2

根据最大功率匹配原则,当$R_0=R$时,取能装置获取的功率最大,此时负载R_0上的功率为:

$$P=I^2R=[U_s/(R_0+R)]^2R=U_s^2/(4R) \tag{6}$$

因此理论上,采用电压取能法可从该段地线中获取的最大功率为总损耗功率的1/4。

2 地线取能设备的工程实现

理论上,按照图2安装地线取能电源已经能够有效实现地线取能,但其长期的可靠稳定运行还需要解决以下与安全性相关的问题。

a. 采用图2所示方法进行取能时,取能电源的一端直接和架空地线相接,而架空地线在线路中一般作为防雷线使用。当架空地线受到雷电冲击,与其相连的取能装置不可避免地也会受到雷电冲击的影响。因此,取能设备本身的防雷设计对于其长期的可靠稳定运行十分关键。

b. 由于用电负荷的波动,相电流的日间波动很大,可以从0变化至线路设计负荷的30%~40%,极端情况下还可能达到线路设计负荷的120%,其将引起电源两端的输入电压大范围波动,因此地线取能设备的设计必须满足该情况下的正常工作和设备安全。

c. 地线上会因为线路操作、变压器投切、相线短路等原因出现瞬时工频高压,对该类干扰的防护也

是地线取能设备设计中必须解决的一个重要问题。

2.1　取能设备稳压电路设计

图 4 为某个成功应用于贵州现场的地线取能系统的稳压电路原理框图,该电路使得地线取能设备能较好地适应线路负荷变化引起的输入电压大幅波动情况。

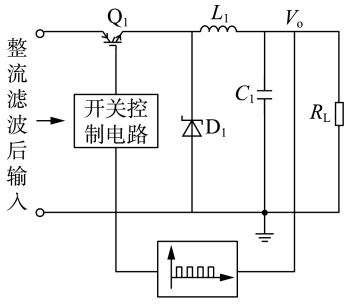


图 4　具有高稳低通特性的 PWM 稳压电路原理图

Fig.4　Schematic diagram of PWM circuit with high voltage stabilization and low voltage conduction characteristics

常规的脉宽调制(PWM)稳压电路的输入电压一般不超过 100 V,难以满足地线感应电压大幅变化的需求,因此本文在设计地线取能设备时采用独立器件 Q_1、L_1、D_1、C_1 构成具有 Buck 功能的 PWM 稳压电路。该电路的开关器件 Q_1 选用了集-射最大耐压值 V_{CE}>500 V、集-射最大导通电流值 I_{CEMAX}=17 A 的高耐压 NPN 三极管。PWM 控制器采用固定 14 kHz 的输出频率,通过 PWM 稳压电路的输出电压 V_o 反馈控制开关器件 Q_1 的占空比,如果 V_o 低于设定输出电压,则占空比升高,否则降低。考虑到地线感应电压偏低时输出功率过小,利用价值不大,因此未选择电路较为复杂的 Buck-Boost 电路,而选择了单一的 Buck 电路。

采用上述电路实现的地线取能装置在实验室条件下的电源输出功率及其与索干线导线电流的关系如表 3 所示。

表 3　取能设备在实验室条件下的输出功率及效率

Table 3　Power and efficiency of extracting power equipment under laboratory conditions

导线电流/A	隔离变压器前端		P_{AC}/(V·A)	电源直流输出端		P_{DC}/W	效率/%
	V_{AC}/V	V_{IC}/V		V_o/V	I_o/A		
217	10.9	0.45	4.9	12.18	0.28	3.41	70
321	19.1	2.04	38.9	12.51	2.10	20.01	67
524	31.2	1.21	37.75	12.65	2.13	26.94	71
681	40.6	0.87	35.32	12.65	2.08	26.32	74
828	49.4	0.72	35.56	12.65	2.07	26.18	73

上述 PWM 电路可以保证地线取能装置在最大整流输出电压小于 500 V 的情况下实现 70%的取能效率。因此,前端保护电路需要保证在任何条件下,到达开关 Q_1 的直流电压峰值不超过 500 V。

2.2　地线取能设备的防雷设计

安装在架空地线上的取能装置可能受到持续时间为几十 μs、冲击幅值为几十至几百 kA 的雷电流冲击,本文防雷设计的思路是通过对冲击电流的逐级泄放对内部电路进行保护。图 5 为地线取能设备的输入保护电路原理。图中,雷电冲击保护电路由大功率 SPD 器件 V_1 和 V_2、退耦电感 L_2 以及瞬态抑制二极管(TVS)器件构成。

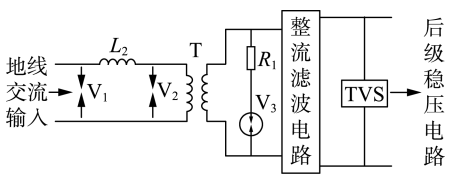


图 5　输入保护电路原理图

Fig.5　Schematic diagram of input protection circuit

在图 5 所示电路的交流输入端加入峰值为 60 kA、波形为 8/20 μs 的雷电模拟冲击,冲击电流波形和 V_2 后端的残压波形如图 6 所示。

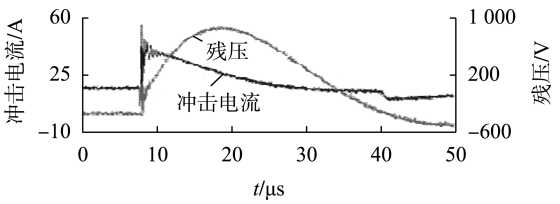


图 6　冲击电流及保护残压波形

Fig.6　Waveforms of lightning current and residual voltage

从图 6 中可以看出,采用本文的防雷设计后,最大残压为 900 V。剩余残压经过工频隔离变压器 T 的衰减和 TVS 能量吸收后到达开关管 Q_1 前端时已经不超过 400 V。采用图 5 所示电路的地线取能设备所能承受的最大冲击电流为 120 kA。

另外,地线取能设备在现场安装时采用图 7 所示的方式[14],该种方式可进一步利用地线上的放电间隙强化设备的整体防雷能力。

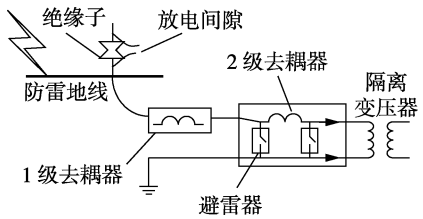


图 7　利用放电间隙实现 3 级防雷示意图

Fig.7　Schematic diagram of three-stage lightning protection realized by discharging gap

2.3　抗瞬时工频过电压设计

瞬时工频过电压主要由相地短路、操作过电压、变压器投切等引起,其特点是电压幅值一般为几百至几千伏,持续时间小于 300 ms。

图 5 中,瞬时工频过电压保护电路由放电管 V_3

和限流电阻 R_1 组成,放电管启动时间为毫秒级,但导通电流较大,对于不超过 1 000 V 的瞬时工频过电压,经过瞬时工频过电压保护电路后,其残压可以控制在 300 V 以下。图 8 为在电源输入端加入 600 V 瞬时工频过压冲击时整流电路输入前端的电压波形,由图可见,其峰值被限制在 200 V 左右。

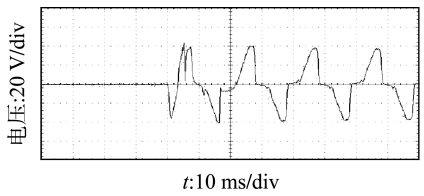


图 8 600 V 瞬时工频电压冲击通过保护电路后的残压波形

Fig.8 Waveform of residual voltage after 600 V instantaneous power voltage shock passes through protection circuit

3 设备内部构架

地线取能装置的内部构架如附录中的图 A1 所示。在取能地线偏短或相线电流偏小的情况下,地线取能设备所能提供的功率可能难以满足在线监测设备的用电要求,因此需要增加蓄电池作为能量蓄水池,在地线感应电不足时用作后备电源。考虑到目前绝大部分在线监测设备的电源控制箱内都安装有蓄电池,图 A1 所示的地线取能装置未额外安装蓄电池。

4 取能设备的适用条件

本文提出的地线取能方法在使用中需要满足以下 3 个外部条件。

a. 条件 1:只能应用于交流线路。由于直流线路没有交变磁场,其地线上的感应电十分微弱,本文方法目前无法用于直流线路。

b. 条件 2:线路上具有 2 根架空地线,并且至少有 1 根地线采用分段接地方式。从目前国内交流输电线路的情况来看,110 kV 线路的架空地线基本采用双地线逐塔接地,220 kV 以上电压等级的线路才会采用分段接地。因此本文所提地线取能方法主要适用于 220 kV 以上电压等级线路。

c. 条件 3:由于本文中所提地线取能装置的最小工作电压为交流 10 V,因此通过计算不同塔形的地线感应电压可知当导线电流大于 200~300 A 时,地线在 1 km 长度上的感应电压可以满足设备工作的要求。

5 现场安装况情况及使用效果

本文所提地线取能设备在现场的实际安装情况如附录中的图 A2、A3 所示。由于安装位置在地电位端,因此本文所提地线取能设备可以在带电的情况下进行安装,与高压取能技术相比,其现场安装更为方便。

地线取能装置可以极大地改善输电线路在线监测装置在冬季的供电状况。由于现场的负载不是纯电阻负载,因此线路负荷和电源的输出功率无法匹配对应。但由地线取能装置代替光伏供电前后,在线监测设备的蓄电池电压变化(如图 9 所示)可看出,在采用地线取能装置供电后,在线监测设备的蓄电池电压有明显的提升。

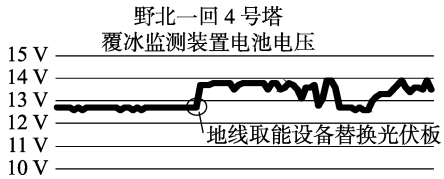


图 9 输电线路在线监测装置蓄电池电压曲线

Fig.9 Curve of battery voltage of online monitoring equipment of power transmission line

6 结语

a. 输电线路架空防雷地线并非绝对的零电位,由于地导互感特性使得架空防雷地线上有较大的感应电;

b. 架空防雷地线上的感应电能和线路负荷、线路长度、导地线相对位置都有密切的关系;

c. 可以采用适当的方式将架空防雷地线上的感应电取出对输电铁塔上的相关设备进行供电;

d. 地线取能设备的接入必须避免对现有地线网络的防雷特性和完整性产生影响;

e. 地线取能设备的设计必须考虑其在工作环境中可能受到的雷击、过电压干扰及地线感应电压稳定度差的特点,并采用相关的对应措施以保证其长期稳定运行。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 熊兰,何有忠,宋道军,等. 输变电线路在线监测设备供电电源的设计[J]. 高电压技术,2010,36(9):2253-2257.
XIONG Lan,HE Youzhong,SONG Daojun,et al. Design on power supply for transmission line on-line monitoring equipment[J]. High Voltage Engineering,2010,36(9):2253-2257.

[2] VASQUEZ-AMEZ R L,MASUDA M,JARDINI J A,et al. Tap-off power from a transmission line shield wires to feed small loads[C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition:Latin America. Sao Paulo,Brazil:IEEE,2010:116-121.

[3] 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.
LI Weifeng,FU Xingwei,BEI Yuncehng,et al. Development of power induction devices for transmission lines[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2011,44(4):516-520.

[4] 戚栋. 一种适应母线动态范围宽的光电式电流互感器供电电源[J]. 中国电机工程学报,2006,26(19):160-164.

QI Dong. A kind of power supply of optic current transformer for accommodating wide bus dynamic[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(19):160-164.

[5] 李红斌,刘延冰,张明明. 电子式电流互感器中的关键技术[J]. 高电压技术,2004,30(10):4-6.
LI Hongbin,LIU Yanbing,ZHANG Mingming. Key technology of electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering,2004,30(10):4-6.

[6] 刘亚东,盛戈皞,王葵,等. 基于相角控制法的电流互感器取电电源设计[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):72-76.
LIU Yadong,SHENG Gehao,WANG Kui,et al. A new design of current transformer energy harvesting power supply based on phase angle control method[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(19):72-76.

[7] BEN-KISH A,TUR M,SHAFIR E. Geometrical separation between the birefringence components in Faraday-rotation fibreoptic current sensors[J]. Optics Letters,1991,16(9):687-693.

[8] 吴耀谦. 从送电线路绝缘地线中抽取电能[J]. 中国电力,1988(7):35-39.
WU Yaoqian. Tapping power from insulated overhead ground wires[J]. Electric Power,1988(7):35-39.

[9] 李先志,杜林,陈伟根,等. 输电线路状态监测系统取能电源的设计新原理[J]. 电力系统自动化,2008,32(1):76-80.
LI Xianzhi,DU Lin,CHEN Weigen,et al. A novel scheme of draw-out power supply utilized in transmission line state monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(1):76-80.

[10] 刘炳尧,储玉凤,肖松兰,等. 调谐法抽能及调谐变压器的研究[J]. 电工技术学报,1991,6(4):37-40.
LIU Bingyao,CHU Yufeng,XIAO Songlan,et al. Study of tuning theory for obtaining power and a tuned transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1991,6(4):37-40.

[11] 刘炳尧,阵彩屏,肖松兰,等. 避雷线调谐抽能的研究[J]. 电力系统及其自动化学报,1991,3(1):115-121.
LIU Bingyao,ZHEN Caiping,XIAO Songlan,et al. Study of tuning and power extraction from the lightning conductor[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,1991,3(1):115-121.

[12] 蒋兴良,谢彦斌,胡建林,等. 典型架空输电线路地线电磁取能等效电路的分析[J]. 电网技术,2015,39(7):2052-2057.
JIANG Xingliang,XIE Yanbing,HU Jianlin,et al. Analysis of equivalent circuit for tapping electromagnetic power from overhead ground wires of typical transmission lines[J]. Power Systems Technology,2015,39(7):2052-2057.

[13] 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. 北京:中国电力出版社,2004:127.

[14] 杨军,徐立宪,杨春生,等. 一种基于输电线路架空防雷地线的取电装置:201410355851.8[P]. 2016-05-05.

作者简介:

毛先胤

毛先胤(1984—),男,贵州瓮安人,高级工程师,硕士,主要研究方向为高压输变电设备技术(**E-mail**:yinxianmao@126.com);

马晓红(1978—),女,宁夏银川人,高级工程师,硕士,主要研究方向为高压输变电设备防冰相关技术;

彭　赤(1974—),男,贵州贵阳人,高级工程师,主要研究方向为输电设备设计和管理;

代　州(1978—),男,贵州黔西人,工程师,硕士,主要研究方向为变电设备相关技术;

杨　军(1971—),男,四川成都人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统自动化、电磁测量技术。

Research on extracting power from sectionalized insulation ground wire

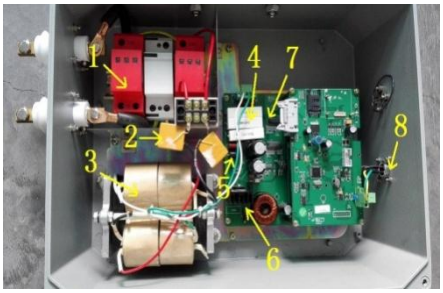
MAO Xianyin[1],MA Xiaohong[1],PENG Chi[2],DAI Zhou[1],YANG Jun[3]

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co.,Ltd.,Guiyang 550002,China;
2. Guizhou Power Grid Co.,Ltd.,Guiyang 550002,China;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering,University of Electronic Science and Technology of China,Chengdu 611731,China)

Abstract:The loss power of ground wires under different phase currents is deduced using the mutual inductance formula,based on which,a method of extracting power from the overhead ground wires is proposed for the sectionalized ground wire network. A power extraction equipment is designed based on the proposed method. The equipment has the characteristics of large input dynamic range,high conversion efficiency and strong anti-interference ability. When the wire load meets the requirements,the power extraction equipment can replace the photovoltaic power supply to realize stable power supply for on-line monitoring equipment.

Key words:transmission lines;extracting power from overhead ground wires;magnetic field induction;voltage stabilizing circuit

附录



1—冲击过流保护器；2—热敏电阻器；3—隔离变压器；4—瞬时工频过压保护；5—TVS 管
6—PWM 稳压电路；7—脉宽调节控制电路；8—电源输出

图 A1 取能装置内部结构图

Fig.A1 Internal structure drawing of device

图 A2 取能装置防雷部分现场安装图

Fig.A2 Installation of lightning protection parts of power supply unit

图 A3 取能装置现场安装图

Fig.A3 Installation of power supply unit in transmission tower