

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.217

架空输电线路地线取能方法

黄欢¹, 邓钰龙², 马晓红¹, 蒋兴良², 吴建蓉¹, 胡琴², 杨旗¹, 吕乾勇¹, 杨柳青¹

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550002; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要:地线取能是电力系统输电网络中各类传感监测设备的一种供能方式。为此,文章对典型架空地线的取电原理进行了分析,建立了等效参数模型,对取电端口的等效电压、等效阻抗进行了数学推导。选择一条 220 kV 线路利用 ATP-EMTP 软件进行了仿真,研究了取能负载对地线电流分布的影响,分析了包括导线电流、接地电阻、档距范围、取能负载等因素对取电参数的影响规律。结果显示:受感应电势和地线自阻抗的限制,地线电流不超过 10 A;取电电压随着取能阻抗的增大呈现增大趋势,最终稳定在 27 V 左右,当取能负载为 2.5 Ω 时,获得最大取能功率为 175.03 W。这些结果为后续取能器的设计提供了数据基础。

关键词:地线;在线取能;ATP-EMTP

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)05-040-10

Ground wire energy extraction method for overhead transmission lines

HUANG Huan¹, DENG Yulong², MA Xiaohong¹, JIANG Xingliang², WU Jianrong¹,
HU Qin², YANG Qi¹, LYU Qianrong¹, YANG Liuqing¹

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, P. R. China;

2. Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Taking energy from the ground wire is a way of supplying energy for all kinds of sensing and monitoring equipment in the power system transmission network. In this paper, firstly, the principle of taking electricity of a typical overhead ground wire was examined. Next, its equivalent parameter model was established. Finally, the equivalent voltage and equivalent impedance of the electricity taking port were mathematically derives. Simulation of a 220 kV line with ATP-EMTP software was carried out. The influence of the energy load on the distribution of ground wire current and the influence of factors including wire current, ground resistance, span range, energy load on the electricity parameters were analyzed. The results show that limited by the induced potential and ground wire self-impedance, the ground wire current did not exceed 10 A. The voltage showed an increasing trend with the increase of impedance, and finally stabilized at about 27 V. When the energy extraction load was 2.5 Ω , the maximum energy extraction power obtained was 175.03 W. These results provide a data basis

收稿日期:2021-05-23 网络出版日期:2021-09-03

基金项目:南方电网有限责任公司防冰减灾重点实验室支撑项目(GZKJXM20190748)。

Supported by Supporting Project of the Key Laboratory of Anti-ice and Disaster Mitigation of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20190748).

作者简介:黄欢(1978—),女,高级工程师,主要从事输电线路技术研究工作,(E-mail)470480531@qq.com。

通信作者:胡琴,男,教授,(E-mail)huqin@cqu.edu.cn。

for the design of subsequent energy takers.

Keywords: ground wire; online energy; ATP-EMTP

架空线路在线监测装置的电能来源主要是太阳能、风能^[1-5]。这些取能方式输出功率小,装置体积大,易受环境天气影响,不能适用于恶劣环境中。近年来,随着在线取能技术的发展,出现了基于相线的电流互感器(CT, current transformer)取电方式(即 CT 取电),以及基于静电感应原理的取电方式^[6-11]。但是,这些取电方式因具有较高的电位,不适用于输电线路地线设备的监测与控制。因此,亟须探究出一种为地线设备供电的取电方式。

在输电线路中,为了防雷和通讯需要,通常使用 2 根地线,一根是逐塔接地的光纤复合地线(OPGW, optical power ground wire),简称 OPGW 地线;一根是分段绝缘的普通地线^[12-15]。一方面,由于二者均进行了接地处理,其对地静电感应电势通常很小,可以忽略不计;另一方面,由电磁感应理论可知,相线电流周围激发交变的磁场,使得空间任意闭合回路中存在感应电势,该电势的值往往很大。因此,可以考虑从架空地线中获取能量为地线在线监测装置提供电能。

图 1 是架空地线电磁感应示意图。可以知道地线上包含了 2 种感应电势:一种是由于相线—地线间存在电容,静电感应产生的电势;另一种是由于相线周围电磁场发生变化,在地线上感应的涡旋电势^[16]。

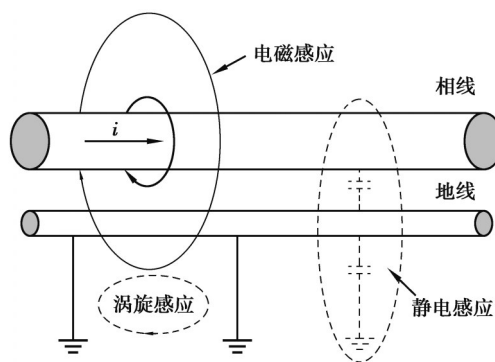


图 1 架空地线电磁感应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic induction of overhead ground wire

目前,关于从地线上取能的研究主要是采用 CT 取电方式。文献[17]介绍了地线取能的等值电路的推导方法,分析了在负载及取能等值参数变化下的调谐取能策略,研究了对地电容、调谐电感以及负载电阻变化的情况下的稳压取能回路输出。文献[18-19]提出双磁路拓扑结构与谐振功率控制相结合的在线取电方法,通过二次侧接入电容使磁路中的励磁电感与电容发生并联谐振,增大该磁路阻抗值,从而控制线路上的电流更多流入双磁路另一磁路线圈,并通过该磁路实现内部阻抗与外部负载值匹配,获取最大功率。文献[20]设计了 2 种安装在输电线路上的能量收集装置来,分析了基于电场的能量收集方法,介绍了利用高压直流线路产生的磁场的低成本线性发电机的可行性研究。文献[21]设计了一种地线取能装置,考虑全天的相电流变化会影响架空地线中的感应电压,在对感应的交流电压进行整流后,使用降压 DC-DC 转换器提供稳定的直流输出电压,为监控装置供电。为使从交流输电线路提取稳定能量,文献[22]提出一种通过阻抗匹配调控的方式,以补偿励磁电感、抑制铁芯饱和。文献[23]建立了基于诺顿定理的架空输电线路的取能等效电路模型,通过 Saber 仿真软件分析了取能装置各项参数对取能功率的影响。

笔者以建立的地线取能等效电路为基础,分析其取能端口的等效电压和等效阻抗,对实际的取能电路进行等效分析。以实际线路的参数,利用 ATP-EMTP 仿真软件,分析地线电流的分布情况以及取能电压、取能功率的影响因素,为后续取能器的设计提供数据支持。

1 输电线路地线取能数学模型

1.1 输电线路的模型建立

图2为地线取能方法示意图。图中存在2个涡旋感应电势,分别在“地线—地线”“地线—大地”所构成的闭合回路中。由于利用“地线—大地”的涡旋感应电势感应取能方式中,须将取能负载接入OPGW,势必会改变架空输电线的结构,影响其防雷性能,所以该方式不予考虑。因此,文中的取能方式考虑使OPGW和普通地线形成一个闭合回路,将取能负载并连接在分段绝缘地线绝缘子两端。

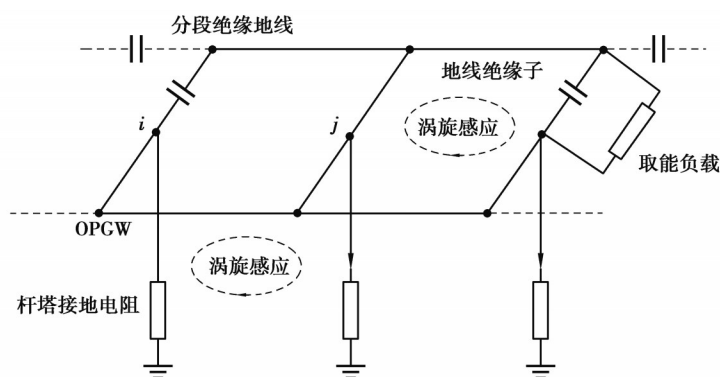


图2 取能示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy extraction

1.2 取能电路等效模型分析

从地线获取的能量大小不仅与相线—地线的空间分布有关,还与地线自身的阻抗有关,因此有必要对取能电路的等效模型进行研究。由上述讨论可以得出地线取能等效电路,如图3所示。

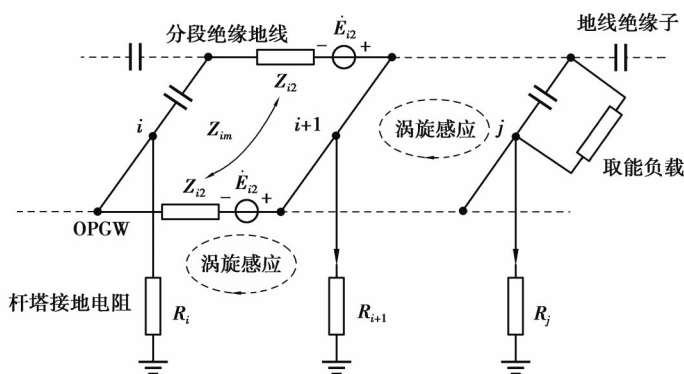


图3 地线取能等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit for obtaining energy from the ground wire

图3中: $i, i+1$ 代表杆塔号; $\dot{E}_{i1}, \dot{E}_{i2}$ 分别为1号地线OPGW与2号普通地线在第*i*档的感应电势; Z_{i1}, Z_{i2} 分别为OPGW和普通地线在第*i*档的自阻抗; Z_{im} 为2种地线在第*i*档的互阻抗; Z_l 为等效取能负载; R_i 为接地电阻。

为便于取能功率的计算分析,有必要对图3的取能回路进行戴维南等效分析。注意到等效电路具有较多的节点,增加了计算的复杂性,因此考虑将节点*i*左侧、节点*j*右侧以及*i*~*j*之间的地线网络用戴维南等效支路代替,如图4所示。

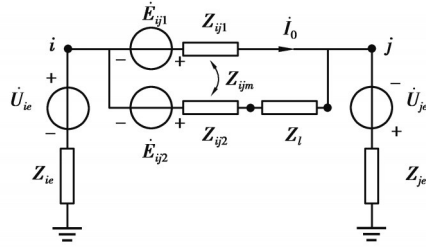


图 4 取能端口的戴维南等效电路

Fig. 4 Thevenin equivalent circuit of the power port

图 4 中： \dot{U}_{ie} 、 \dot{U}_{je} 为从 i 节点向左看进去和 j 节点向右看进去的等效电压； Z_{ie} 、 Z_{je} 为从 i 节点向左看进去和 j 节点向右看进去的等效阻抗； \dot{E}_{ij1} 、 \dot{E}_{ij2} 为 1 号和 2 号地线在节点 $i\sim j$ 间产生的感应电势； Z_{ij1} 、 Z_{ij2} 为 1 号和 2 号地线在节点 $i\sim j$ 间的自阻抗； Z_{ijm} 为 1 号和 2 号地线在节点 $i\sim j$ 间的互阻抗。

戴维南电路考虑了整个线路的拓扑节点,可以很好地对取电功率进行研究。由图 4 可知

$$\begin{cases} \dot{U}_e = \dot{E}_{ij2} - \dot{E}_{ij1} + \dot{I}_0 (Z_{ij1} - Z_{ijm}), \\ \dot{I}_0 = (\dot{U}_{ie} + \dot{U}_{je} + \dot{E}_{ij1}) / (Z_{ie} + Z_{je} + Z_{ij1}), \\ Z_e = Z_{ij2} - Z_{ijm} + f (Z_{ij1} - Z_{ijm}), \\ f = (Z_{ie} + Z_{je} + Z_{ijm}) / (Z_{ie} + Z_{je} + Z_{ij1}), \end{cases} \quad (1)$$

式中： \dot{U}_e 为取能负载两端的等效开路电压； Z_e 为从取能负载两端看进去的等效阻抗； \dot{I}_0 为不接取能负载时 1 号地线流过的电流。

对于 \dot{U}_{ie} 、 \dot{U}_{je} 、 Z_{ie} 、 Z_{je} 的分析,参考文献[1]可知,对于均匀参数的线路,可以简便计算有:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ie} = \dot{U}_{je} = k \dot{E}_{10}, \\ Z_{ie} = Z_{je} = k Z_{10}, \\ k = \sqrt{0.25 + R_0 / Z_{10}} - 0.5, \\ \dot{E}_{10} = l \cdot j0.1445 I_A (a^2 \lg \frac{d_{1a}}{d_{1b}} + a \lg \frac{d_{1a}}{d_{1c}}), \\ Z_{10} = l \cdot \left[R + 0.05 + j0.1445 \lg \left(\frac{660 \sqrt{\rho / f}}{r_e} \right) \right], \end{cases} \quad (2)$$

式中： l 为地线平均档距； \dot{E}_{10} 为 1 号地线感应电势； I_A 为导线电流； a 为转角因子， $a = e^{j120^\circ}$ ； d_{1a} 为地线距离 A 相导线的距离； d_{1b} 为地线距离 B 相导线的距离； d_{1c} 为地线距离 C 相导线的距离； Z_{10} 为 1 号地线的自阻抗； R 为地线的直流电阻； ρ 为土壤电阻率,通常取 $100 \Omega \cdot m$ ； f 为电流频率； r_e 为地线的半径。

对于 \dot{E}_{ij1} 、 \dot{E}_{ij2} 、 Z_{ij1} 、 Z_{ij2} 的分析,由于地线的自阻抗通常远小于杆塔接地电阻,可以认为 OPGW 对地绝缘,因此, $i\sim j$ 之间的感应电势和阻抗可以用各档感应电势和阻抗之和代替,则有:

$$\begin{cases} \dot{E}_{ij1} \approx s \dot{E}_{10}, Z_{ij1} = s Z_{10}, \\ \dot{E}_{ij2} \approx s \dot{E}_{20}, Z_{ij2} = s Z_{20}, \end{cases} \quad (3)$$

式中： \dot{E}_{20} 、 Z_{20} 分别为 2 号地线的感应电势和自阻抗； s 为档距系数,即档距长度与档距均值之比。

由式(1)~(3)可得:

$$\begin{cases} \dot{U}_e \approx s \left(E_{20} - \frac{Z_{m0}}{Z_{10}} E_{10} \right), \\ Z_e \approx s (Z_{10} + Z_{20} - 2Z_{m0}), \\ Z_{m0} = l \cdot j0.14451g \left(\frac{660 \sqrt{\rho l f}}{d_{12}} \right), \end{cases} \quad (4)$$

式中： Z_{m0} 代表平均档距地线间的互阻抗； d_{12} 代表两地线间的距离。

2 模型的仿真计算

为方便起见,文中以某220 kV线路为例对地线取能功率进行了研究计算。线路的导线、地线空间分布示意图见图5所示。导线为2*LGJ-400,其等效半径为74.8 mm,直流电阻为0.08 Ω /km。2根地线分别为逐塔接地的复合地线OPGW-13-100-1和分段绝缘的普通地线GJ-70,它们的半径分别为6.8 mm和5.5 mm,直流电阻分别0.8 Ω /km和1.7 Ω /km。土壤电阻率取100 $\Omega \cdot \text{m}$ 。线路长度约32 km,其间包括81基杆塔,杆塔平均接地电阻约为10 Ω ,档距约为300 m。

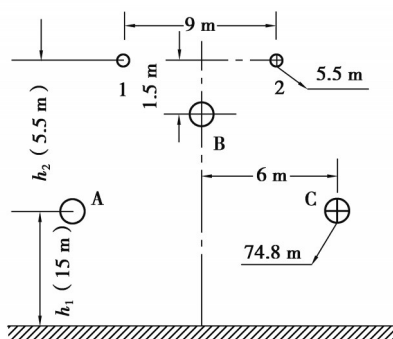


图5 导线-地线空间分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the spatial distribution of wire-ground wires

图5中,1、2分别为分段绝缘的普通地线和逐塔接地的复合地线OPGW;A、B、C为三相导线; h_1 、 h_2 分别为相线—大地,相线—地线间的距离。

为了计算取能负载开路和接入状态下的功率、电压、电流分布,文章对这条特定线路进行了模拟仿真。仿真软件采用ATP-EMTP,仿真示意图如图6所示。

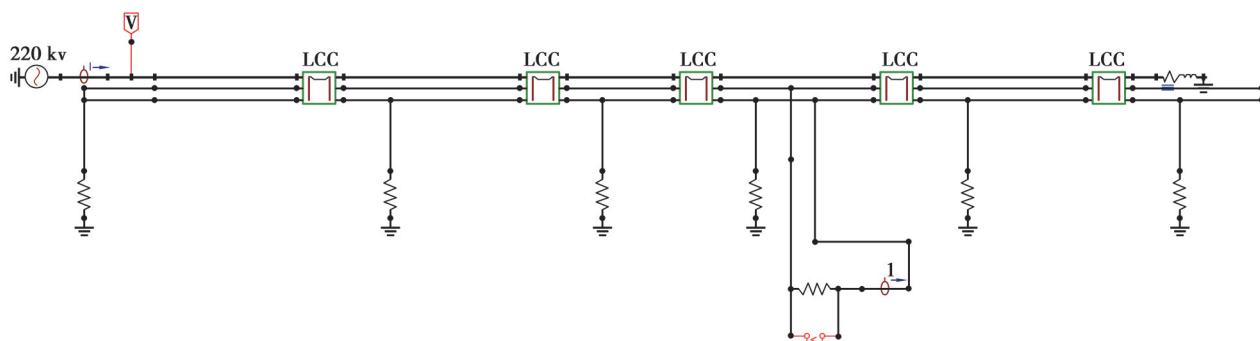


图6 地线取能仿真示意图

Fig. 6 Schematic diagram of ground wire energy extraction simulation

2.1 地线电流分布情况

研究输电线路地线电流分布对于取能装置的布置有着重要的意义。为了方便检测地线电流,仿真中在2个杆塔之间串联了一个0.01 Ω 的电阻。表1为取电端口位于69号杆塔大号侧(靠近70号杆塔)时,各杆塔对应的地线电流分布情况。

表1 地线电流分布情况
Table 1 Current distribution in the ground wire

取能阻抗/ Ω	67号	68号	69号	70号	71号
2.5	8.88	9.65	9.97	2.88	1.92
5.0	6.18	7.16	7.56	3.17	2.05
10.0	4.40	5.54	5.95	3.36	2.15
∞	2.32	3.63	4.06	3.61	2.27

从表1中可以看出:由于感应电势和地线自阻抗的影响,地线电流不超过10 A,在取能端口小号侧,地线电流随着杆塔的增多而增加,这是由来自小号杆塔的地线电流流向每一个档距时都会进行累叠造成的。70号杆塔的地线电流明显减小,这是由于取能装置的存在,对电能进行了部分截取,在几个档距内电流会回升至初始状态。从表中数据还可以看出:在取能端口前端,随着取能阻抗的增加,相应杆塔的地线电流呈现下降趋势;在取能端口后侧,随着取能阻抗的增加,相应杆塔的地线电流呈现增加趋势。这可能是由于随着取能阻抗的增加,从端口获得的电能减小,更多的电能流向下一级,出现了电流增加的趋势。当取能阻抗为无穷大时,此时相当于取能负载开路情况,此时各杆塔对应的地线电流较接入取能负载时小,这可能是由于取能负载的接入改变了原有线路阻抗分布,从而使电压进行重新分布。

2.2 取能功率影响因素的分析

从地线取能端口获取的电能受多种因素的影响,主要包括导线电流、接地电阻、档距范围、取能负载等,探究它们对取能电压、取能功率的影响规律是设计取能器参数的前提。

2.2.1 导线电流对取能功率的影响分析

导线中的电流由于用电负荷的不确定性会呈现不规律的波动。根据电磁场理论,导线中流过交流电,在周围空间产生交变的磁场,地线位于这种交变的磁场中,会产生感应电势,并且随着导线电流的变化,感应电势会发生变化,从取能端口获取的电能也会随着变化。表2是不同导线电流下取能电压、取能功率的部分数据。可以看出:取电电压随着导线电流的增大呈现上升趋势,验证了上述分析。

表2 不同导线电流下取能电压、取能功率的大小

Table 2 The values of energy extraction voltage and energy extraction power under different wire currents

导线电流/A	接地电阻/ Ω	档距范围/km	取电负载/ Ω	取电电压/V	取电功率/W
484	10	0.9	2.5	32.21	414.99
404	10	0.9	2.5	26.86	288.58
300	10	0.9	2.5	19.95	159.20
214	10	0.9	2.5	14.26	81.34
110	10	0.9	2.5	7.23	20.91

图7是取能电压、取能功率与导线电流的关系图。从图7可以看出,取电电压和导线电流大致呈现一次线性关系,取电功率与导线电流大致呈现二次关系。具体的拟合关系为:

$$\begin{cases} U = 0.0667I + 0.0678, \\ P = 0.0018I^2 + 0.0024I - 0.5647, \end{cases} \quad (5)$$

式中: U 为取电电压; P 为取电功率; I 为导线电流。

2.2.2 接地电阻对取能功率的影响分析

在输电线路中,由于电压等级,地理环境,绝缘安全等因素,不同的杆塔往往具有不同的接地电阻。接地电阻的大小一般会影响地线电流的大小,从而影响取能端口的输出电能。接地电阻的大小一般受土壤电阻率的影响。根据标准^[24],一般线路的接地电阻不超过15 Ω 。表3是不同接地电阻时取能电压、取能功率的部分数据。

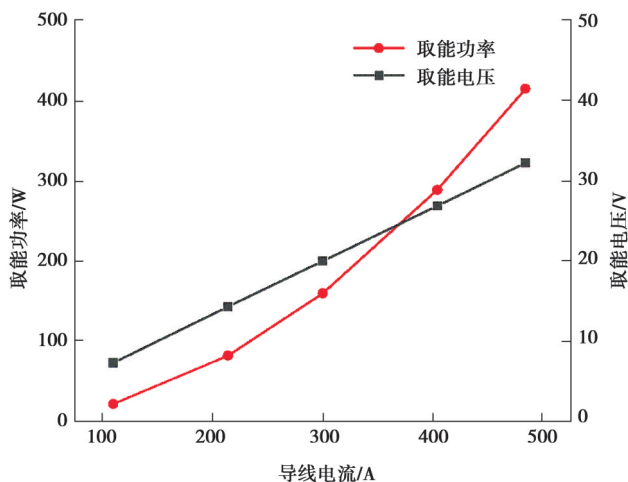


图7 取能电压、取能功率与导线电流的关系图

Fig. 7 Relationship of energy extraction voltage, energy extraction power and wire current

表3 不同接地电阻时取能电压、取能功率的大小

Table 3 The values of the energy extraction voltage and energy extraction power under different grounding resistances

导线电流/A	接地电阻/ Ω	档距范围/km	取电负载/ Ω	取电电压/V	取电功率/W
300	15.0	0.9	2.5	19.98	159.68
300	10.0	0.9	2.5	19.95	159.20
300	5.0	0.9	2.5	19.80	156.82
300	2.5	0.9	2.5	19.39	150.39
300	1.0	0.9	2.5	18.13	131.48

图8是取能电压、取能功率与接地电阻的关系图。由图8可以看出:随着接地电阻的增大,取能电压和取能功率均呈现增大的趋势,这是由于接地电阻的增大相当于加剧了地线与大地间的绝缘程度,使取能端口前端的电能不易流向大地,而汇集于取能端口。进一步地,随着接地电阻进一步增大,取能电压基本稳定在20 V左右。

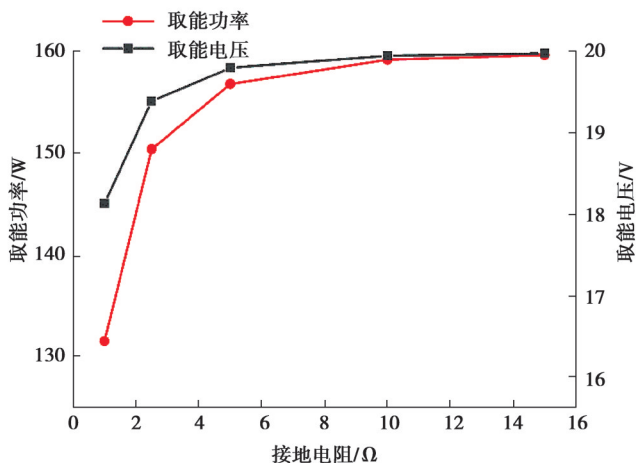


图8 取能电压、取能功率与接地电阻的关系图

Fig. 8 Relationship of energy extraction voltage, energy extraction power and grounding resistance

2.2.3 档距范围对取能功率的影响分析

由于输电线路设计的需要,可能会出现不同距离的档距,为了使后续设计的取能器适应于不同档距的输电线路,有必要研究档距范围对取电电压、取电功率造成的影响。表4是不同档距范围时取能电压、取能功

率的大小。

表 4 不同档距范围时取能电压、取能功率的大小

Table 4 The values of the energy-derived voltage and the energy-derived power in different gear ranges

导线电流/A	接地电阻/ Ω	档距范围/km	取电负载/ Ω	取电电压/V	取电功率/W
300	5	0.9	2.5	19.80	156.82
300	5	1.2	2.5	23.79	226.39
300	5	1.5	2.5	26.90	289.44
300	5	1.8	2.5	29.45	246.92
300	5	2.1	2.5	31.69	401.76

图 9 是取电电压、取电功率随档距范围变化的关系图。可以知道：取电功率、取电电压与档距范围成一次线性关系。这是由于线路档距范围越大，积累的电能越多，则取出的电能越多。对其关系进行拟合为：

$$\begin{cases} U=9.81L+11.61, \\ P=203.43L-20.9, \end{cases} \quad (6)$$

式中： U 为取电电压； P 为取电功率； L 为档距范围。

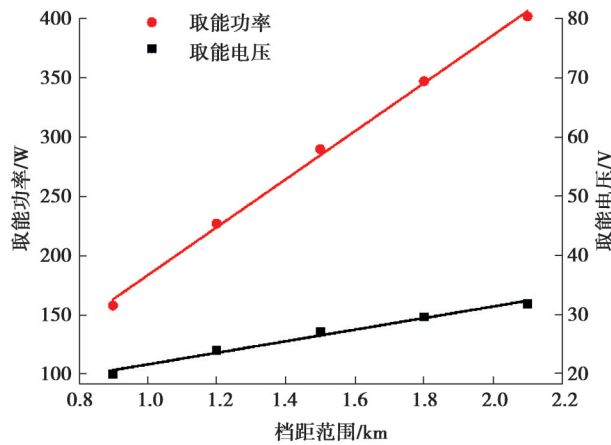


图 9 取电电压、取电功率与档距范围的关系图

Fig. 9 Relationship between the voltage, the power and the gear range

2.2.4 取能阻抗对取能功率的影响分析

输电线路地线存在一定的自阻抗，由于取能阻抗的变化，势必对获取的电能产生影响。因此，为获得最大取能功率，需对阻抗匹配问题进行探究。表 5 是取能阻抗变化时取电电压和取能功率的部分数据。

表 5 不同取能阻抗时取能电压、取能功率的大小

Table 5 The values of the energy extraction voltage and energy extraction power under different energy extraction impedances

导线电流/A	接地电阻/ Ω	档距范围/km	取电负载/ Ω	取电电压/V	取电功率/W
300	5	0.9	0.5	8.10	131.22
300	5	0.9	1.0	13.03	175.03
300	5	0.9	2.5	19.80	156.82
300	5	0.9	5.0	23.45	109.98
300	5	0.9	10.0	25.63	65.69
300	5	0.9	20.0	26.78	35.86
300	5	0.9	∞	27.02	0

图10为取电电压、取电功率与取能阻抗的关系图。由图10可知:随着取能阻抗的增大,取能电压也在增大,最终稳定在27 V左右,基本接近取能负载开路时端口的电压。在取能负载为2.5 Ω 时,取能功率取得最大值175.03 W。

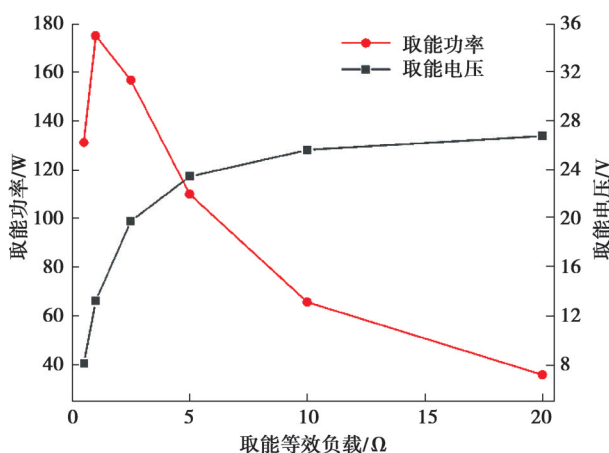


图10 取电电压、取电功率与取能阻抗的关系图

Fig. 10 Relationship of the voltage, the power and the impedance

3 结论

由于电力系统输电网络中各类传感监测设备具有低电位的特点,从地线中取能为其供电成为一种可行性的方案。文章以建立的地线取能等效电路为基础,分析其取能端口的等效电压和等效阻抗,对实际的取能电路进行等效分析。参考实际线路的参数,利用 ATP-EMTP 仿真软件,分析地线电流的分布情况以及取电电压、取电功率的影响因素。结果表明:

1) 由于感应电势和地线自阻抗的影响,地线电流不超过 10 A,在取能端口小号侧,地线电流随着杆塔的增多而增加;

2) 由于电磁感应原理,导线电流对取电电压的影响大致呈现一次线性关系,导线电流对取电功率的影响大致呈现二次关系;

3) 取电电压和取电功率随着接地电阻的增大均呈现增大的趋势,因此可以考虑适当增大接地电阻进而增加取电功率;

4) 取电功率、取电电压与档距范围成一次线性关系,因此可以考虑在多档距取电,以增加取电功率;

5) 取电电压随着取能阻抗的增大也在增大,最终稳定在 27 V 左右,基本接近取能负载开路时端口的电压,在取能负载为 2.5 Ω 时,取电功率取得最大值 175.03 W。

参考文献

- [1] 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 X L, Xie Y B, Hu J L, et al. Analysis of equivalent circuit for tapping electromagnetic power from overhead ground wires of typical transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2052-2057. (in Chinese)
- [2] 田志刚, 赵宏伟, 冯波, 等. OPGW 感应取电技术概述[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(4): 155-158.
Tian Z G, Zhao H W, Feng B, et al. An overview of OPGW induction technology[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(4): 155-158. (in Chinese)
- [3] Horton R, Halpin M, Wallace K. Induced voltage in parallel transmission lines caused by electric field induction[C]//IEEE International Conference on Transmission & Distribution Construction. IEEE, 2006.
- [4] Raghunathan V, Kansal A, Hsu J, et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems[C]//Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. IEEE, 2005: 457-462.
- [5] Yamaguchi T, Takano S, Naganuma O, et al. Development of power supply system for obstruction lights exploiting induced current which flows through overhead ground wires[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE, 2002.
- [6] 谢彦斌, 蒋兴良, 胡建林, 等. 典型架空输电线路分段绝缘地线取能研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 947-955.

- Xie Y B, Jiang X L, Hu J L, et al. Study on power-tapping from segmented insulation ground wire of typical overhead transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 947-955. (in Chinese)
- [7] 谢彦斌,唐杰,林立,等. 架空输电线路地线多点取能的功率分布特性[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2018, 15(4): 54-61.
Xie Y B, Tang J, Lin L, et al. Power distribution characteristics of multi-point energy acquisition for overhead transmission lines [J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2018, 15(4): 54-61. (in Chinese)
- [8] 谢彦斌. 高压架空输电线路在线取能方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
Xie Y B. Study on On-line power-tapping method of HV overhead transmission line[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [9] Vasquez-Arnez R L, Masuda M, Jardini J A, et al. Tap-off power from a transmission line shield wires to feed small loads[C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. Sao Paulo, Brazil: IEEE, 2010: 116-121.
- [10] Berthiaume R, Blais R. Microwave repeater power-supply tapped from the overhead ground wire on 735 kV transmission-lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(1): 183-184.
- [11] Blais R, Berthiaume R. Reliable power-supply tapped from overhead ground wire on 735 kV transmission-lines[J]. Electric Power Systems Research, 1978, 1(2): 117-119.
- [12] 黄心怡. 高性能电流互感器及其取电电源设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
Huang X Y. The design of high-performance current transformer and its power supply[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] Gururaj B I, Nandagopal M R. Design parameters for earth-wire power tapping[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1970, 117(1): 177.
- [14] Maruvada P S, Harbec G. Capacitive power tap-off from transmission lines using ground wires: calculation of the equivalent circuit parameters[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97(4): 1194-1201.
- [15] Qi G, Zheng Y, Xia K, et al. Equivalent circuit parameters of power tap-off from insulated shield wires of high voltage transmission lines at different rated voltages[C]//International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). IEEE, 2018.
- [16] 范松海, 谢彦斌, 刘益岑, 等. 逐塔接地条件下 OPGW 地线取能方法研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 141-145, 151.
Fan S H, Xie Y B, Liu Y C, et al. Study on power tapping method from optical power ground wire (OPGW) grounded to each tower of transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 141-145, 151. (in Chinese)
- [17] 黄一格, 陈玮杰, 许晓玲. 基于 Multisim 的绝缘地线取能稳压方法研究[J]. 电气开关, 2020, 58(6): 23-27, 31.
Huang Y G, Chen W J, Xu X L. Research on multisim-based voltage stabilization method for tap-off power from insulated ground wire[J]. Electrical Switch, 2020, 58(6): 23-27, 31. (in Chinese)
- [18] 王旭红, 胡韵睿, 樊绍胜, 等. 采用双磁路的电流互感器在线取电方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 187-199.
Wang X H, Hu J R, Fan S S, et al. On-line power acquiring method of current transformer with dual magnetic circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 187-199. (in Chinese)
- [19] 王旭红, 胡韵睿, 刘星, 等. 基于并联谐振的双磁路在线取电方法研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(12): 63-70.
Wang X H, Hu J R, Liu X, et al. Research on online power acquiring method of dual magnetic circuit based on parallel resonance[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(12): 63-70. (in Chinese)
- [20] Guo F, Hayat H, Wang J. Energy harvesting devices for high voltage transmission line monitoring[C]//Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011: 1-8.
- [21] Vasquez-Arnez R L, Masuda M, Jardini J A, et al. Tap-off power from the overhead shield wires of an HV transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 986-992.
- [22] 张鹏宇, 孟润泉. 基于阻抗调节的交流输电线路特种取能电源研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 11963-11968.
Zhang P Y, Meng R Q. Research on special energy source for AC transmission line based on impedance adjustment[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 11963-11968. (in Chinese)
- [23] 王浩哲, 刘之方, 李永亮, 等. 基于输电网架空地线感应电流的取能装置设计[J]. 广东电力, 2020, 33(6): 99-106.
Wang H Z, Liu Z F, Li Y L, et al. Design of energy acquisition device based on induced current of overhead ground wire in transmission network[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(6): 99-106. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110kV~750kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of 110kV-750kV overhead transmission line: GB 50545—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese)