

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231324

基于辅助磁芯阻抗自适应调整的输电线路在线稳定取能方法

詹坤^{1,2}, 高广德¹, 陈亚龙², 罗劲浩², 李光竹¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北能源集团鄂州发电有限公司, 湖北 鄂州 430010)

摘要: 针对输电线路电流大范围波动导致在线取能装置能量溢出的问题, 为保障取能需求提出了一种基于辅助磁芯阻抗自适应调整的输电线路在线稳定取能方法。通过增添辅助磁芯, 构建取能支路和信号支路的多磁路模型来达到稳定取能的目的。基于母线电流、取能支路线圈电流和信号支路线圈电流之间的联系, 在 Matlab/Simulink 仿真和试验平台上搭建了相应的取能模型。分别在不同电流、有无辅助磁芯两种工况下探究取能支路的运行效果, 同时对成本、控制复杂度及可靠性进行分析。最后的仿真和试验结果表明, 输电线路电流由 30 A 上升至 100 A, 取能负载输出电压仍能维持在稳定范围内, 在无须额外供电模块的条件下也能保障取能负载输出电压, 满足在线监测装置的供电需求。

关键词: 在线取能; 辅助磁芯; 阻抗调整; 宽范围电流; 输出电压; 低发热

An online stable energy extraction method for a transmission line based on adaptive adjustment of auxiliary core impedance

ZHAN Kun^{1,2}, GAO Guangde¹, CHEN Yalong², LUO Jinhao², LI Guangzhu¹

(1. School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Energy Group Ezhou Power Generation Co., Ltd., Ezhou 430010, China)

Abstract: To address the issue of energy overflow in online energy harvesting devices caused by large fluctuations in current in power transmission lines, a method for stable online energy harvesting on transmission lines based on adaptive adjustment of auxiliary magnetic core impedance is proposed. By adding auxiliary magnetic cores and constructing a multi-magnetic circuit model for the energy harvesting branch and signal branch, the goal of stable energy harvesting is achieved. Based on the relationship between busbar, energy harvesting branch coil, and signal branch coil currents, a corresponding energy harvesting model is built on the Matlab/Simulink simulation and test platform. The operational effects of the energy harvesting branch are investigated at different current levels and with or without auxiliary magnetic cores. The costs, control complexity, and reliability are also analyzed. The simulation and test results demonstrate that even as the current in the power transmission line rises from 30 A to 100 A, the output voltage of the energy harvesting load can still be maintained within a stable range. This confirms that the output voltage of the energy-harvesting load can be maintained without additional power supply modules, meeting the power supply requirements of online monitoring devices.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51907104).

Key words: online energy extraction; auxiliary core; impedance adjustment; wide range current; output voltage; low fever

0 引言

输电线路作为电网运行中必不可少的一部分, 是电能传输的载体。为确保输电线路的安全、稳定和有效运行, 在线监测装置得到广泛应用^[1-6]。如何

为在线监测装置提供稳定有效的电能是当前的重点^[7-8], 主要供电方式包括太阳能、电容分压式、激光、架空地线和电流互感器(current transformer, CT)取能。太阳能供电一般通过太阳能电池组件和蓄电池相结合的方法进行使用^[9-11], 具有清洁、环保、成本低、电路简易和可靠性高等优点, 但其供电效率受天气因素影响较大, 在线监测装置广泛应用于

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51907104)

环境恶劣的偏远地区, 蓄电池的寿命也使该方法受限。电容分压式取能通过电容器连接高压母线与地线获取电压^[12-14], 但该方法存在对电容器精度和绝缘要求过高及可靠性低等缺点。激光供电使用光纤将激光从低电位发射至高电位, 通过光电转换器将激光转换为电能^[15-16], 优势在于输出功率不依赖输电线路电压, 但光电转换技术的不成熟和高成本仍是主要问题。架空地线取能通过分段绝缘地线进行感应取能^[17-18], 但该方法可能会对线路的继电保护产生影响。此外, 取能装置的性能受线路结构、跨度、塔架接地电阻及接地线路工作模式等多个因素影响。

针对上述问题, 电流互感器取能技术被广泛应用于输电线路在线监测。为保障稳定有效的取能, 国内外学者对取能原理进行了分析, 明确了输出功率、磁芯规格与线圈匝数的关系^[19-22]。电流互感器取能具有获取能量简单、体积小、成本低、环保、安装和保养简单等优点, 然而输电线路电流变化范围大, 如何保障取能装置在获得必要能量的前提下有效地泄去多余能量是电流互感器取能的重点。文献[23]通过电磁继电器改变二次侧线圈匝数的机械式办法来调节输出功率, 虽有一定成效, 但是装置制作会变得十分复杂, 在高压输电线路不易实现。文献[24-25]提出利用匹配阻抗和反向注入电流的办法来达到降低负载输入电压的目的, 但需要额外提供控制单元并对其进行供电。文献[26-28]阐述了PWM稳压原理, 但如何利用该原理构造一个自适应稳压取能装置也是一个值得思考的问题, 同时也需应用高频率晶体管。文献[29]利用双向可控硅加储能电容的组合, 其结构简单、效率高并且无须提供额外的供电单元, 但输出电压波形并非正弦波形。

根据上述相关文献分析, 现有电流互感器在线取能电路的泄能处理普遍采用开关电路, 通过在合适的时间对晶体管进行通断处理来实现稳压效果, 但都存在着制作复杂和需要提供额外供电单元的缺点。针对以上问题, 本文提出了一种基于辅助磁芯自适应阻抗调整的输电线路在线稳定取能方法。通过引入辅助磁芯, 利用辅助磁芯构建信号支路, 在合适的时段输出控制信号控制取能磁芯回路的通断, 达到无须额外供电单元也可稳定输出电压的目的。

1 取能电路结构

1.1 取能电路电流变换原理

考虑到输电线路电流主要取决于发电功率和用户负荷, 整个线路可视为理想电流源。如图1将开气隙磁芯串在输电导线上, 在二次侧并入匹配电容

来减少磁芯励磁阻抗带来的影响, 采用AC/DC变换电路对负载和锂电池进行充放电管理。磁芯的内径和外径分别为 d 和 D , 磁芯等效磁路半径为 r , 磁芯厚度为 h , 磁芯气隙厚度为 δ , 磁芯的相对磁导率和真空磁导率分别为 μ 和 μ_0 , 磁芯磁通和母线电流分别为 Φ 和 I 。文献[24]给出励磁电感 L_m 表达式为

$$L_m = \frac{\Phi}{I} = \frac{h\mu\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{\pi D + (\mu - 1)\delta}{\pi d + (\mu - 1)\delta}\right) \quad (1)$$

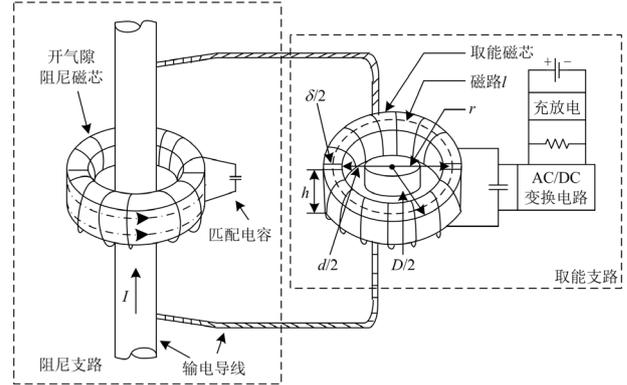


图1 CT取能装置结构

Fig. 1 Structure of CT energy extraction device

磁芯励磁电阻损耗 P 主要体现在磁滞损耗 P_h 、涡流损耗 P_e 和剩余损耗 P_c , 表示为

$$P = P_h + P_e + P_c \quad (2)$$

文献[30]给出单位体积(m^3 , 低频下忽略剩余损耗 P_c)磁芯励磁电阻损耗的计算公式为

$$P = K_h f B^2 + K_e f^2 B^2 \quad (3)$$

式中: K_h 和 K_e 分别为磁滞损耗和涡流损耗系数; f 为工作频率; B 为最大磁感应强度; 通过对 $P-B$ 关系曲线进行拟合可得 K_h 和 K_e 取值分别为10.44和1.18。

由磁通定义的最大磁感应强度为

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{2\mu\mu_0 I}{(D^2 - d^2)\pi^2} \times \ln\left(\frac{\pi D + (\mu - 1)\delta}{\pi d + (\mu - 1)\delta}\right) \quad (4)$$

联立式(3)和式(4)可求得励磁电阻 R_m 为

$$R_m = \frac{PV}{I^2} = (K_h f + K_e f^2) V \times \left[\frac{2\mu\mu_0}{(D^2 - d^2)\pi^2} \times \ln\left(\frac{\pi D + (\mu - 1)\delta}{\pi d + (\mu - 1)\delta}\right) \right]^2 \quad (5)$$

式中: S 为磁芯截面积; V 为磁芯体积。

图2为取能等效电路模型。 R_{lk1} 和 L_{lk1} 分别为一次侧线圈的电阻和漏感, R_{lk2} 和 L_{lk2} 分别为二次侧线圈电阻和漏感, N_1 和 N_2 分别电流互感器CT一、二次侧线圈匝数, 其中 N_1 恒为1, L_m 为阻尼磁芯的

励磁电感, C 为二次侧匹配电容, R_L 为取能负载。

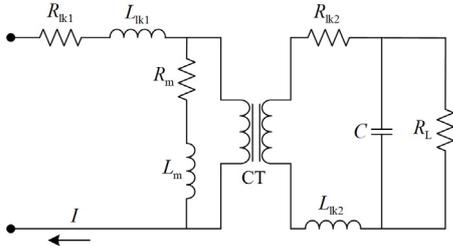


图 2 取能等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of energy extraction

为简化计算, 忽略一、二次侧线圈电阻和漏感, 则二次侧匹配电容 C 、励磁阻抗 Z_m 、二次侧输出电压 U_L 可以表示为

$$N^2 C = \frac{L_m}{R_m^2 + \omega^2 L_m^2} \quad (6)$$

$$Z_m = \frac{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}{R_m} \quad (7)$$

$$U_L = \frac{I}{N_2} \times \frac{Z_m R_L}{N_2^2 R_L + Z_m} \quad (8)$$

式中, ω 为电网角频率。

1.2 阻抗自适应调整原理

阻抗自适应调整原理即利用单向晶闸管通断特性, 通过增添辅助支路达到稳定输出电压的目的, 从而避免母线大电流时取能负载的能量溢出。图 3 为双磁芯取能模型, 取能支路由取能 CT1、匹配电容 C_1 、整流电路、控制回路、泄能负载 R_2 和取能负载 R_1 构成。辅助支路由辅助 CT2、匹配电容 C_2 、负载 R_3 、单向晶闸管 TR 和控制回路构成。

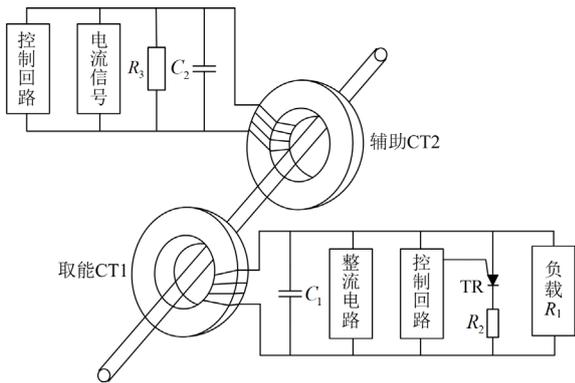


图 3 双磁芯取能模型

Fig. 3 Double magnetic core energy harvesting model

当输电线路母线电流增加时, 取能 CT1 和辅助 CT2 二次侧电流也随之增加, 一旦辅助 CT2 二次侧电流增加到特定阈值, 控制信号将触发单向晶闸管 TR 导通, 随即泄能负载 R_2 并入取能回路, 有效限

制取能负载 R_1 的输出电压。

单向晶闸管具有导通后直至两端电压降为零后才可关断的特性, 所以在 $t=0$ s 和 $t=T/2$ 时判断是否需要并入泄能负载, 辅助 CT2 二次侧通过并联电抗器使辅助磁芯二次侧输出电压相位超前取能磁芯二次侧 CT1 输出电压 $T/4$ 。晶闸管及取能负载状态图如图 4 所示, U_{R1} 、 U_{R2} 、 U_{TR} 和 U_{R3} 分别为 CT1 二次侧取能负载 R_1 、泄能负载 R_2 、单向晶闸管 TR 和负载 R_3 输出电压。当 $t=0$ s 时, 取能 CT1 输出电压为 0 V, 辅助 CT2 输出电压达到最大值; 当辅助 CT2 输出电压大于规定值时, 单向晶闸管 TR 导通, 泄能负载 R_1 并入取能回路泄去多余的能量, 直至 $t=0$ s、 $T/2$ 或 T 时晶闸管两端电压降低至 0 V 时方可关断; 若辅助 CT2 输出电压小于规定值, 晶闸管不会导通, 取能负载 R_1 正常吸收电能。泄能负载 R_2 是否并入取能磁芯线圈取决于初始状态下辅助磁芯线圈的输出电压, 与取能磁芯线圈输出电压无关。

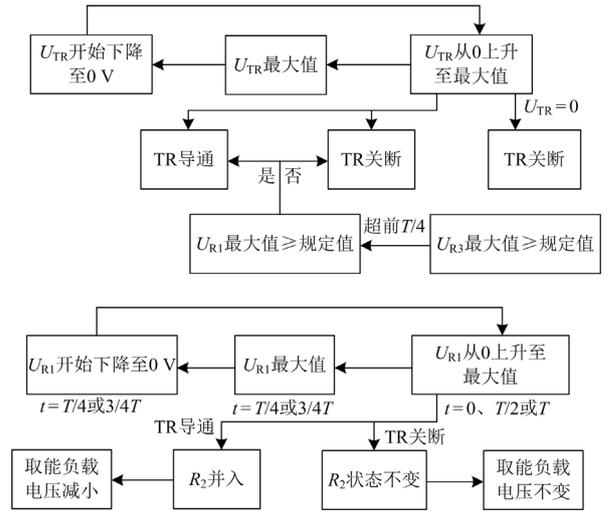


图 4 晶闸管及取能负载状态图

Fig. 4 Thyristor and energy harvesting load state diagram

2 电路设计

2.1 阻抗自适应调整原理

根据 1.2 节原理设计自适应调整阻抗稳定输出电压的电路模型, 阻抗自适应调整电路图如图 5 所示, CT1 为取能磁芯, CT2 和 CT3 为辅助磁芯, C_1 、 C_2 和 C_3 分别为 CT1、CT2 和 CT3 的匹配电容, C_4 和 R_{L2} 组成阻容电路用于吸收晶闸管通断产生的冲击电流和振荡电压, BR1、BR2 和 BR3 分别为取能支路和辅助支路整流桥, D_1 和 D_2 为辅助支路稳压二极管, R_1 和 R_2 分别为取能线圈的取能负载和泄能负载, L_1 和 R_3 分别为辅助 CT2 移相电抗器和辅助

CT3 辅助负载, TR_1 、 TR_2 、 TR_3 、 TR_4 为单向晶闸管, R_4 — R_{11} 均为大电阻。

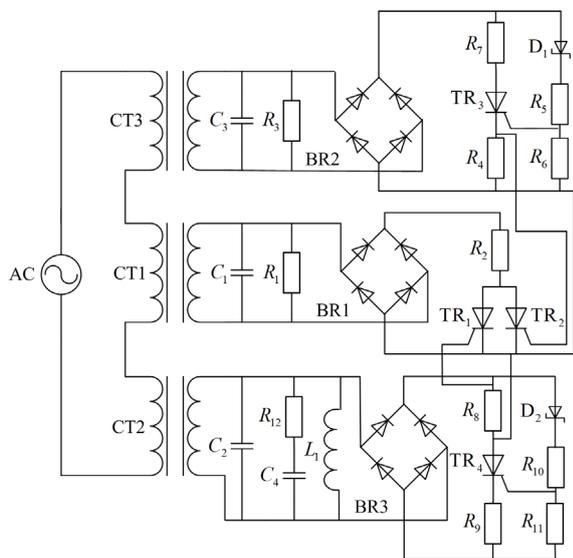


图 5 阻抗自适应调整电路图

Fig. 5 Impedance adaptive adjustment circuit diagram

电流变化下输出电压时序图如图 6 所示, U_{L1} 、 U_{R1} 和 U_{TR1} 分别为辅助线圈 CT2、取能线圈 CT1 和单向晶闸管 TR_1 输出电压, U_{max} 和 U_{min} 分别为状态变化前后电压幅值, 虚线为未并入泄能负载电压波形, 实线为实际运行电压波形。在 t_0 — t_1 时段, 输电线路母线电流大小保持不变, CT1 和 CT2 副边输出电压为正弦波形, 但 U_{L1} 相位时刻超前于 U_{R1} 相位 $T/4$, 此时段 U_{L1} 与 U_{R1} 维持初始状态, 稳压管 D_2 不会达到导通值, 无法给予单向晶闸管 TR_1 电流信号。 t_1 时刻输电线路母线电流突增, U_{L1} 增大, D_2 达到导通值, TR_4 获得电流信号导通, 与此同时 TR_1 也获得电流信号得到导通; U_{R1} 本应增大, 但由于 TR_1 导通致使泄能电阻 R_2 并入电路, 本应增大的 U_{R1} 不会增大; t_2 时刻 U_{L1} 减小至最小值 0 V, 此时 TR_4 两端电压降为 0 V, 致使自动关断; 同一时刻 U_{R1} 增大, TR_1 两端电压上升仍处于导通状态; 当 U_{TR1} 减小至 0 V 且 D_2 关断时 TR_1 才恢复关断状态; 在 t_1 — t_2 时段, U_{L1} 增大, U_{R1} 维持初始状态。由于 U_{L1} 相位超前 U_{R1} 相位 $T/4$, 则在 $t=0$ 时就可判断是否导通 TR_1 。

图 7 为母线电流在 $t=T/4$ 时电流变化下输出电压时序图, t_0 时刻电流激增导致 U_{R1} 激增, 此时 U_{L1} 为 0 V, U_{R1} 为最大值, 由于 D_2 未达到导通条件, TR_1 两端电压为 0 V, 处于关断状态, 泄能电阻无法并入, 但 D_1 达到导通值给予 TR_2 导通信号, 泄能

电阻并入, 当 U_{R1} 逐渐减小至 0 V、 U_{TR2} 减小至 0 V 时 TR_2 关断, 直至下一周期开始后导通。通过引入单向晶闸管 TR_2 和辅助磁芯 CT3, 当 U_{R1} 达到一定值时导通; 当 TR_1 导通时, 不论 TR_2 是否导通都不会影响稳压电路正常运行, 若 TR_1 在正常运行时没有达到导通电压, 则 TR_2 也不会被导通, 增添辅助磁芯 CT3 可以确保取能线圈输出电压不超过其规定值。

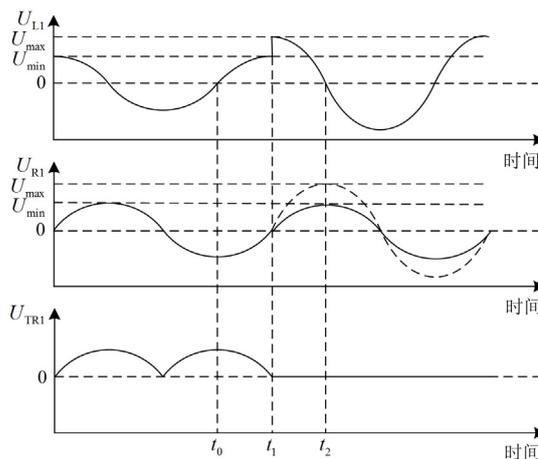


图 6 电流变化下输出电压时序图

Fig. 6 Output voltage timing diagram when current changes

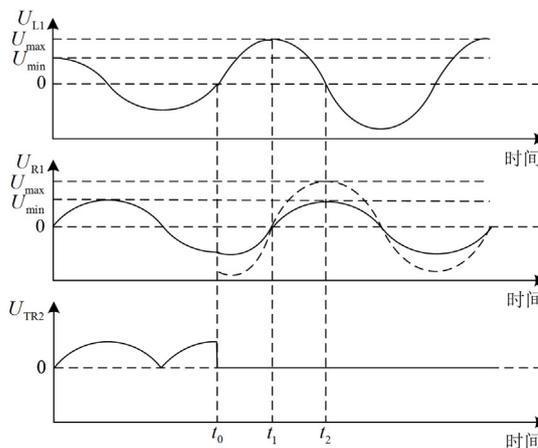


图 7 t 为 $T/4$ 时电流变化下输出电压时序图

Fig. 7 Timing diagram of output voltage under current variation when t is $T/4$

当输电线路母线电流减小时, 取能支路的泄能负载应当移出取能支路才能保证取能装置的稳定运行。图 8 为母线电流减小时输出电压时序图, U_{max} 和 U_{min} 分别为状态变化前后运行幅值。 t_0 时刻, 输电线路母线电流有效值减小二分之一, 由于晶闸管的关断特性, 泄能负载并不能立即移出取能支路,

在 $t_0 - t_1$ 时段, 取能负载输出电压立即减小一半, 直至 $t_1 - t_2$ 时段晶闸管才可正常关断, 致使取能负载输出电压恢复。理论上若输电线路母线电流有效值减小 $(N-1)/N$ 倍, 则规定输电线路输出电压有效值大于 $3U_{\min}/4$ 即可保障输出电压在取能范围内。

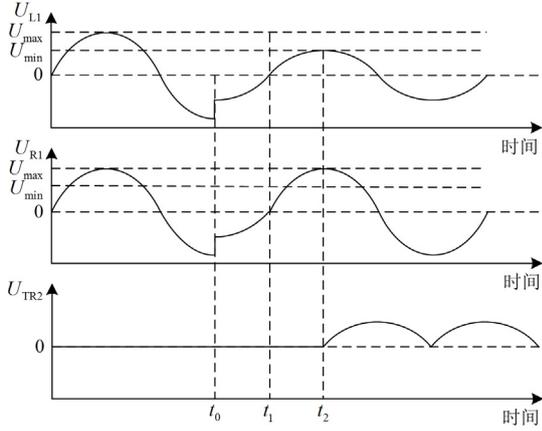


图 8 母线电流减小时输出电压时序图

Fig. 8 Time sequence diagram of output voltage when bus current decreases

为了限制输出电压, 本文利用了泄能支路的并入方法。根据输出电压的要求, 输电线路的电流被划分为多个区间, 以设计匹配的阻抗。图 9 为阻尼支路等效电路图, R_1 为取能负载, R_2 为泄能支路, S_n 为第 n 次达到最大电压时需要动作的开关, R_{2n} 为第 n 次达到最大电压时需要并入的电阻; 在取能线圈二次侧并入多个匹配电阻, 其中 R_2 由多个电阻和晶闸管组成。

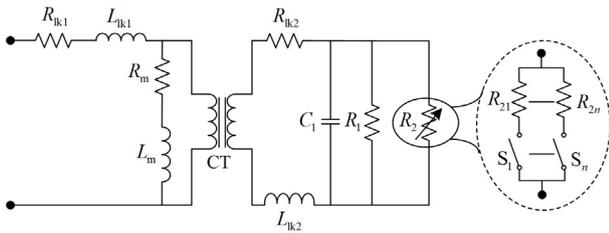


图 9 阻尼支路等效电路图

Fig. 9 Equivalent circuit diagram of damping branch

$$\begin{cases} U_{r \max} = (I_n / N_2) \times 1 / [1 / (Z_m N_2^2) + 1 / R_1 + 1 / R_{2(n-1)}] \\ U_{r \min} = (I_n / N_2) \times 1 / [1 / (Z_m N_2^2) + 1 / R_1 + 1 / R_{2n}] \\ U_{m \max} = (I_n / N_2) \times 1 / [1 / (Z_m N_2^2) + 1 / R_3] \\ U_{l_n \max} = (I_n / N_2) \times 1 / [1 / (Z_m N_2^2) + 1 / 2\pi f L i] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $U_{r \min}$ 和 $U_{r \max}$ 分别为取能负载所能允许的最小幅值和最大幅值; $U_{m \max}$ 和 $U_{l_n \max}$ 分别为第 n 次

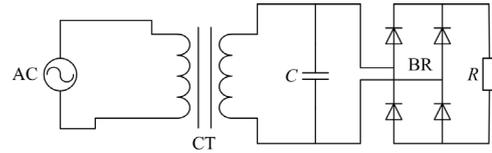
需要并入泄能负载时的 R_3 和 L_i 的电压; I_n 为第 n 次达到最大电压时的运行电流; $R_{2(n-1)}$ 表示第 n 次辅助负载达到最大电压前的取能支路二次侧总电阻, 其中 i 为复数。

综上所述, 随着输电线路母线电流的变化, 通过调整取能线圈二次侧的并入电阻大小, 可以有效调节输出电压, 并解决励磁支路电流过大的问题。

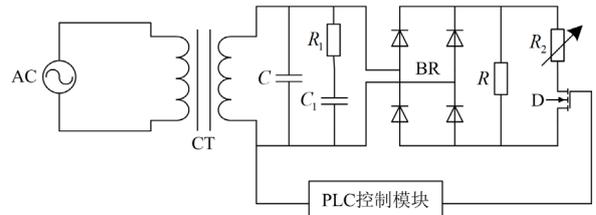
2.2 成本、控制复杂度及可靠性分析

图 10 为在线取能电路模型图, 图 10(a)为常规在线取能电路模型图, 通过 CT 为负载 R 提供电能, 然而在电流大幅度变化的情况下, 取能装置无法稳定输出电压。图 10(b)为常规在线取能稳压电路模型图, 也是通过增添泄能支路 D 和 R_2 来达到稳定输出电压的目的, 其中 R_2 为可调电阻。

在成本方面, 本文通过增添辅助磁芯和晶闸管来达到稳定输出电压的目的, 主要成本增加来自于辅助磁芯和晶闸管。如图 10(b)所示, 通过增添 PLC 控制模块和晶体管来达到稳定输出电压的目的, 主要成本来自 PLC 控制模块, 文献[24-28]采用该种稳压方式。



(a) 常规在线取能电路模型图



(b) 常规在线取能稳压电路模型图

图 10 在线取能电路模型图

Fig. 10 Online energy harvesting circuit model

在控制复杂程度方面, 本文直接将在线取能装置并入输电线路, 利用辅助支路为取能支路提供控制电流, 无须额外电源。图 10(b)所示的 PLC 控制模块通过采集取能支路电流来控制晶体管, 对于 PLC 控制模块需要额外电源供电, 以及在电流大幅变化的输电线路如何稳定提供这种供电和采集稳定控制信号, 都是需要解决的关键问题。

在供电可靠性方面, 无论单独存在 CT2 或 CT3, 均可对取能负载的输出电压进行限制; 若只存在

CT2, 取能负载输出电压如图 6 所示, 若只存在 CT3, 取能负载输出电压如图 11 所示, 其中辅助 CT3 输出电压为 U_{R3} 。 t_0 时刻输电线路电流增大, TR_2 导通直至 T 时关断; t_1 时刻 D_1 导通, TR_2 导通, 在 $t=0$ 至 t_1 时段取能负载输出电压正常吸收电能, t_1 至 $T/2$ 时段取能负载输出电压减少, 但能稳定输出电压。第 3 节和第 4 节通过建立仿真与试验平台, 分析了设计电路的性能, 确保取能负载的输出电压维持在安全范围内, 保障在线监测装置的稳定供电。

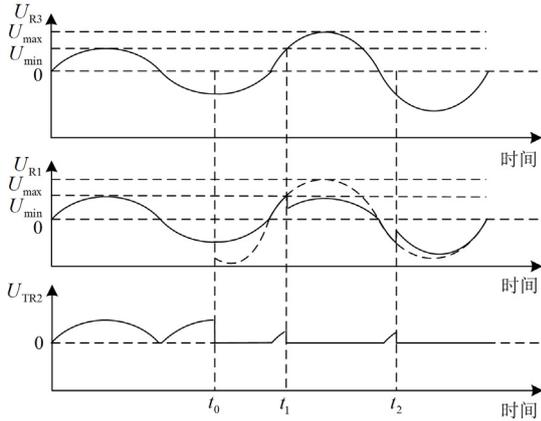


图 11 保留 CT3 时取能负载输出电压

Fig. 11 Output voltage of the energy harvesting load while retaining CT3

3 仿真分析

为验证上述理论分析的正确性, 通过 Simulink 平台搭建了基于辅助磁芯阻抗自适应调整的输电线路在线取能模型, 仿真模型中输电线路母线电流选择频率为 50 Hz 的交流电源, 为简化计算, 忽略取能线圈的电阻和漏感。磁芯主要参数如表 1 所示。

表 1 阻尼磁芯主要参数

Table 1 Main parameters of damping magnetic core

参数	取值	参数	取值
磁芯磁导率 $\mu/(H/m)$	7000	内径 d/m	0.04
磁芯厚度 h/m	0.06	外径 D/m	0.12
气隙厚度 δ/m	0.0001	磁芯体积 V/m^3	0.6×10^3

将表 1 磁芯主要参数代入到式(1)、式(5), 可以得到磁芯励磁电感 L_m 和励磁电阻 R_m 参考值, 这些参考值进一步用于式(6)以确定磁芯副边的匹配电容, 仿真模型主要参数如表 2 所示。

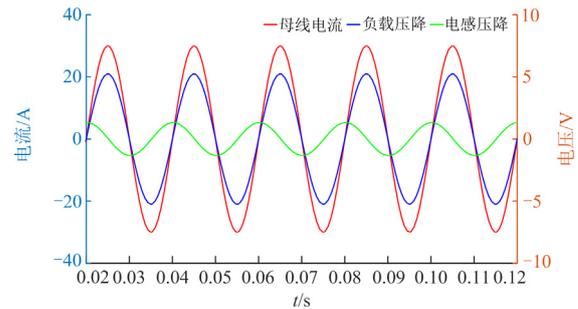
为了减小电流互感器磁芯带来的相位影响, 在其二次侧并入匹配电容, 通过式(7)得到等效阻抗为 213.255Ω 。等效阻抗与移相电抗值相差越大, 则 CT1 和 CT2 二次侧输出电压相位差越接近 $T/4$ 。图

12(a)和图 12(b)分别展示了母线峰值电流为 30 A 和 80 A 时的负载 R_1 与电感 L_1 电压波形, U_{L1} 相位超前 U_{R1} 相位 $T/4$, 当负载压降大于 10 V 时, 晶闸管导通泄能负载 R_2 并入, 使得负载压降维持在 5~10 V 内。对比图 12(a)、图 12(b)可得, 即使母线峰值电流增加一倍负载电压输出值也不会超过 10 V。

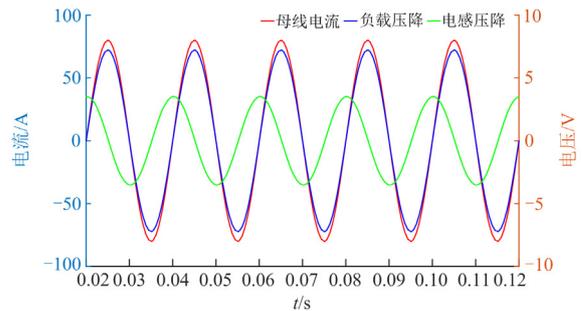
表 2 仿真模型主要参数

Table 2 Main parameters of simulation model

参数	取值	参数	取值
励磁电感 L_m/H	29.1×10^{-6}	匹配电容 $C_1 - C_3/F$	1.54×10^{-5}
励磁电阻 R_m/Ω	2.5×10^{-3}	匝数比 N_2 / N_1	150
取能负载 $R_1, R_2/\Omega$	30	R_2/Ω	26
$R_4 - R_{11}/\Omega$	1000	D_1 稳压值/V	10
L_1/H	$0.06/\pi$	C_4/F	5×10^{-5}
U_{rmax}/V	10	U_{rmin}/V	5
R_{12}/Ω	10	D_2 稳压值/V	2.5
U_{mmax}/V	10	U_{lnmax}/V	5.1



(a) 母线峰值电流为 30 A 时负载和电感压降



(b) 母线峰值电流为 80 A 时负载和电感压降

图 12 稳定运行时仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform during stable operation

当母线峰值电流达到 57.038 A 时, 负载 R_1 和电感 L_1 的最大电压分别为 10 V 和 2.50 V。如图 13 所示, 晶闸管有时导通有时不导通, 导通时电压减半, 否则电压不变。这种电压波动是感性和容性元件造成的, 虽然电压值有细微偏差, 但负载电压始终未超过最大允许值。

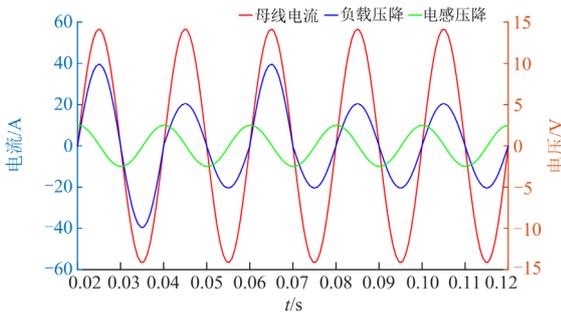


图 13 负载压降最大时仿真波形

Fig. 13 Simulation waveform at maximum load voltage drop

图 14 为基于电感 L_1 压降最大时仿真波形，在 0.045 s 时母线峰值电流由 30 A 增至 60 A，此时由于 U_{L1} 呈下降趋势，尽管电流增加了一倍，电感的压降仍不能使晶闸管导通。此外，由于泄能负载无法接入取能支路， U_{R1} 会直接增大一倍。若母线电流突然增大几倍，则 U_{R1} 会增加到无法承受的数值。

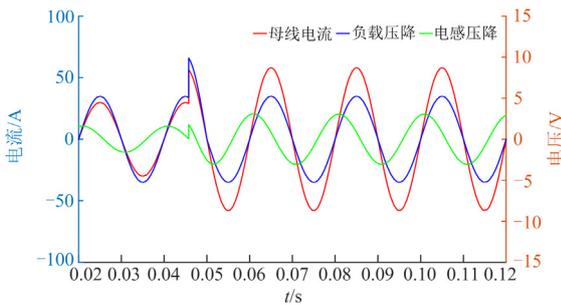


图 14 电感压降最大时仿真波形

Fig. 14 Simulated waveform at maximum inductive voltage drop

仅依靠 U_{L1} 仍无法保障取能装置输出电压稳定性，额外新增 U_{R3} 来判断泄能负载是否接入取能支路。如图 15 所示，仿真波形表明在负载压降最大时，综合负载和电感压降数据来评估是否可导通晶闸管。若电感压降不足以作为依据，将依靠等效负载电压进行判断；当电感压降能够作为判断依据时，等效负载压降不会影响此判断；反之，等效负载压降将成为触发晶闸管的关键依据，从而保证取能装置稳定运行。

如图 15 所示，在 0.045 s 时，输电线路的母线电流从 30 A 增加至 60 A。由于电流的增大是瞬时的，该点处的负载电压也会激增，通过电阻和电容的组合来吸收振荡电压。此外，尽管母线电流增加了一倍，但由于新增的辅助负载 R_3 ，即使电感电压不足以导通晶闸管，取能负载的输出电压也得以维持在安全范围内。

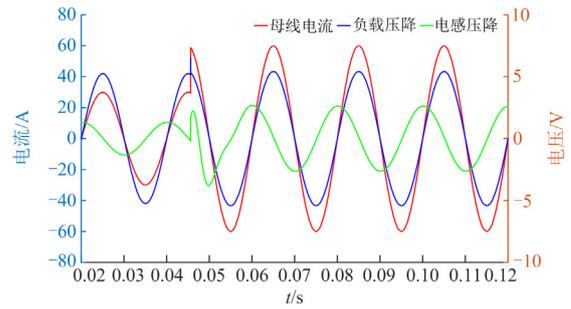


图 15 新增辅助负载压降最大时仿真波形

Fig. 15 Simulated waveform at maximum voltage drop of newly added auxiliary load

4 试验分析

为验证上述理论分析的正确性，搭建了试验平台，利用大电流发生器提供频率为 50 Hz、幅值为 30~100 A 的电流，设计电压范围为 5~10 V 的稳压电路。铁芯材质选择 O 型硅钢片，阻尼磁芯主要参数如表 1 所示，晶闸管型号为 BTA41-600BRG，整流桥由 4 个 SMAF M7F 的低压降整流二极管组成， D_1 和 D_2 导通阈值分别为 10 V 和 2.51 V， R_4 — R_{11} 均为 1000 Ω ，单向晶闸管 TR_1 — TR_4 型号均为 TYN616RG，在线取能仿真试验平台如图 16 所示。

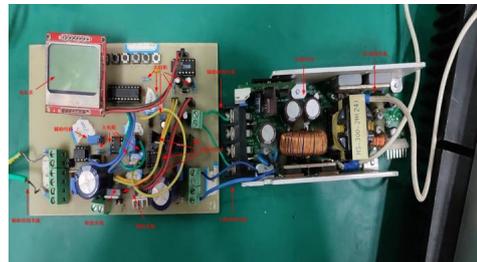
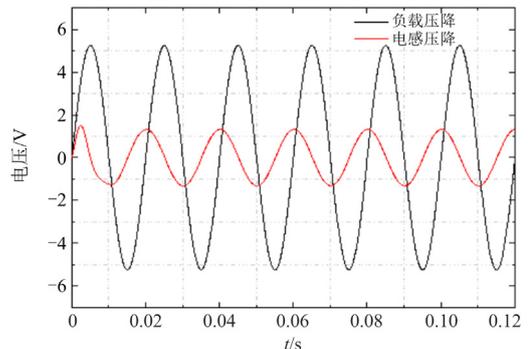


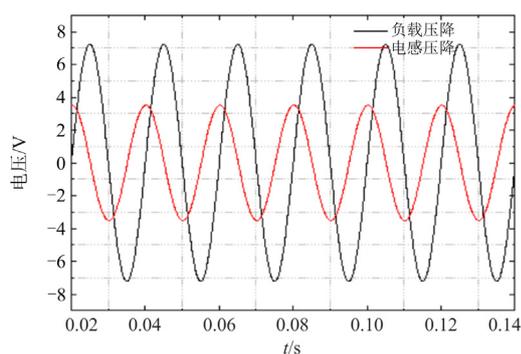
图 16 在线取能仿真试验平台

Fig. 16 Online energy harvesting simulation test platform

利用大电流发生器生成大小不同的峰值电流，频率为 50 Hz；当母线电流为 30/80 A 时，电感和取能负载输出电压波形如图 17 所示；图 17(a)为母线



(a) 母线峰值电流为 30 A 时负载和电感压降



(b) 母线峰值电流为80 A时负载和电感压降

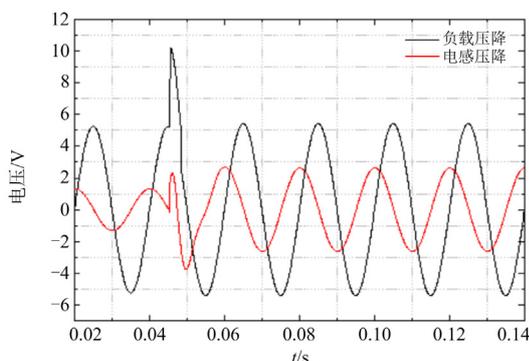
图 17 母线电流 30/80 A 时输出电压波形

Fig. 17 Output voltage waveform at bus current of 30/80 A

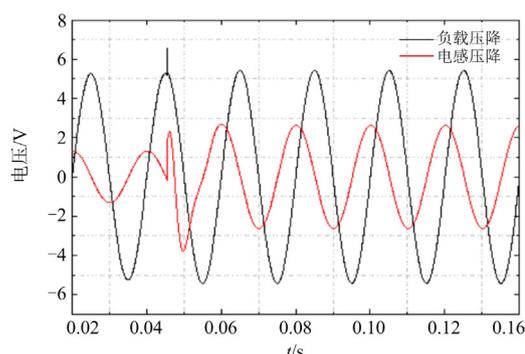
峰值电流为 30 A 时的电压波形, 取能负载输出电压没有达到最大值时正常吸收电能; 图 17(b)为母线峰值电流为 80 A 时的电压波形, 通过计算得到, 当母线峰值电流为 57.038 A 时, $U_{m \max}$ 和 $U_{ln \max}$ 分别为 10 V 与 2.51 V, TR_4 导通带动 TR_1 导通, 保障取能负载输出电压稳定在规定范围内。

当母线峰值电流为 57.038 A 时, 取能负载与电感电压波形如图 18 所示。图 18(a)中 0.043 s 时母线峰值电流由 30 A 增加到 57.038 A, 由于此时电感电压呈下降趋势, 负载电压呈上升趋势, 负载电压在 0.045 s 时达到 10 V, 但电感电压没有达到 2.51 V, TR_4 不能带动 TR_1 导通。图 18(b)为新增判断条件后的电压波形, 在 0.045 s 时取能负载输出电压达到 10 V, TR_3 带动 TR_2 导通, 泄能负载并入取能支路。

通过改变母线峰值电流得到不同电流下取能负载输出电压, 如表 3 所示, 当母线峰值电流为 30~50 A 时, R_1 峰值电压由 5.26 V 上升至 8.76 V; 当母线峰值电流为 50~60 A 时, R_1 峰值电压上升至 10 V 时, 若不并入 R_2 取能负载最大电压有效值近似于 7.071 V, 但实际测试时由于误差因素, R_1 峰值电压在 9.93 V 时泄能负载 R_2 就已并入; 当母线峰值



(a) 基于电感压降最大时电压波形



(b) 基于负载压降最大时电压波形

图 18 母线电流 57.038 A 时电压波形

Fig. 18 Voltage waveform at bus current 57.038 A

表 3 不同电流下输出电压

Table 3 Output voltage under different currents

母线电流/A	R_2 是否并入	R_3 电压/V	R_1 电压/V	R_1 峰值电压/V
30	否	3.771	3.771	5.26
40	否	4.959	4.959	7.01
50	否	6.199	6.199	8.76
57.038	否	7.071	7.071	9.93
60	是	7.439	3.768	5.33
70	是	8.678	4.396	6.22
80	是	9.918	5.024	7.12
90	是	11.16	5.731	7.99
100	是	12.40	6.280	8.88

电流为 60~100 A 时, R_1 峰值电压由 5.33 V 上升至 8.88 V; 在该过程中, 将取能负载的峰值电压限制在 5~10 V 范围内, 确保了取能装置的稳定运作。

5 结论

针对电流互感器在线取能装置在母线电流宽范围变化和大电流下的能量溢出问题, 本文提出了一种基于辅助磁芯阻抗自适应调整的输电线路在线稳定取能方法。通过对辅助线圈负载和电感电压进行监视, 达到控制泄能支路的效果, 确保在不同母线电流下稳定输出电压, 有效地防止设备由于能量过载而损坏。通过仿真模型验证了取能电路可能出现的问题和解决策略。样机测试结果表明, 当母线峰值电流从 30 A 上升至 100 A 时, 取能负载能在限定电压内稳定吸收电能, 超出限制电压时泄能负载立即接入, 保障取能负载正常运行。

本文主要论述了母线电流在宽范围变化时自适应调整二次侧阻抗来控制输出电压的研究, 而未论述磁芯和发热对取能负载的影响。同时考虑到取能装置自带锂电池供电, 未探讨母线电流下降瞬时电压降低带来的影响, 后续将对母线电流变化时取能

负载产生的瞬时影响展开研究。

参考文献

- [1] KUMAR B, MOHAPATRA A, CHAKRABARTI S, et al. Phase angle-based fault detection and classification for protection of transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 133.
- [2] 何常根. 新疆输电线路在线监测设备供电可靠性研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 12-15.
HE Changgen. Research on reliability of power system for transmission line online monitoring device[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(10): 12-15.
- [3] 刘宇, 胡上茂, 刘刚, 等. 基于 LoRa 和 GPRS 的山区输电线路监测信号无线传输方案[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 177-183, 189.
LIU Yu, HU Shangmao, LIU Gang, et al. Wireless transmission scheme of transmission line monitoring signals in mountainous area based on LoRa and GPRS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 177-183, 189.
- [4] 谭卫斌, 张维, 权立, 等. 一种新型配电网在线监测装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 158-165.
TAN Weibin, ZHANG Wei, QUAN Li, et al. Development of a new on-line monitoring device for distribution network lines[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 158-165.
- [5] 张焕龙, 齐企业, 张杰, 等. 基于改进 YOLOv5 的输电线路鸟巢检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 151-159.
ZHANG Huanlong, QI Qiye, ZHANG Jie, et al. Bird nest detection method for transmission lines based on improved YOLOv5[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 151-159.
- [6] 陈杰, 刘牧阳, 邓小宇, 等. 基于离散信息模型的电力系统汇集点惯量在线监测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 44-52.
CHEN Jie, LIU Muyang, DENG Xiaoyu, et al. Online monitoring method of power system convergence point inertia based on discrete information modelling[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 44-52.
- [7] 石振南. 高压输电线路运行环境在线监测系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
SHI Zhennan. Design of on-line monitoring system for operating environment of high voltage transmission line[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [8] 陈常涛. 高压 CT 在线取能装置的优化分析与实现[D]. 济南: 山东大学, 2017.
CHEN Changtao. Optimization analysis and realization of high voltage CT online power collection device[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [9] 胡江华. 应用于输电线路在线监测设备的太阳能电源设计与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
HU Jianghua. Design and research of the solar power supply of transmission line on-line monitoring device[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [10] 郝晓红, 钦建峰, 王金都, 等. 新能源系统储能用铅酸电池使用寿命的影响因素分析[J]. 能源工程, 2012(4): 10-14.
HAO Xiaohong, QIN Jianfeng, WANG Jindu, et al. Analysis of factors influencing the lifetime of lead acid battery for renewable energy storage system[J]. Energy Engineering, 2012(4): 10-14.
- [11] 晋殿卫, 顾则宇, 张志宏. 锂电池健康度和剩余寿命预测算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 122-130.
JIN Dianwei, GU Zeyu, ZHANG Zhihong. Lithium battery health degree and residual life prediction algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 122-130.
- [12] 李青山, 皇甫羽飞, 张帅, 等. 110 kV 输电线路电容降压取电系统雷电过电压分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2058-2063.
LI Qingshan, HUANGFU Yufei, ZHANG Shuai, et al. Lighting over-voltage analysis of 110 kV transmission line capacitor step-down power system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2058-2063.
- [13] RODRIGUEZ J. Electric field energy harvesting from medium voltage power lines[D]. RMIT University, 2017.
- [14] 郑涛, 康恒, 宋伟男. 可实现低频输电系统不对称故障穿越的 M3C 电容电压均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 130-140.
ZHENG Tao, KANG Heng, SONG Weinan. Asymmetric fault ride-through control strategy for low-frequency transmission systems realizing the capacitor voltage balance of modular multilevel matrix converters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 130-140.
- [15] 朱炜, 高学山, 吴晓兵, 等. 混合光电电流互感器的反馈式激光供能[J]. 微纳电子技术, 2007(增刊 1): 146-149.
ZHU Wei, GAO Xueshan, WU Xiaobing, et al. Power supply of hybrid optical-electronic current transformer on feedback mode[J]. Micronanoelectronic Technology, 2007(S1): 146-149.
- [16] 张秋雁, 李红斌, 程含渺, 等. 有源电子式电流互感器在线监测技术研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 208-213.
ZHANG Qiuyan, LI Hongbin, CHENG Hanmiao, et al. Research on online monitoring technology for active electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 208-213.
- [17] 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 Yanbin, JIANG Xingliang, HU Jianlin, 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.
- [18] 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 Yanbin, HU Jianlin, 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.
- [19] 熊魁, 岳长喜, 李登云. 高磁导率比双铁芯电流互感器原理和误差性能研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 114-119.
XIONG Kui, YUE Changxi, LI Dengyun. Research of theory and error characters of high magnetic permeability ratio two cores current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 114-119.
- [20] 黄星, 廖建权, 王山, 等. 基于感应滤波的高压取电装置谐波抑制方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25): 191-196.
HUANG Xing, LIAO Jianquan, WANG Shan, et al. Harmonic suppression method for high-voltage power take-off devices based on induction filtering[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(25): 191-196.
- [21] 丁涛, 邵淮岭, 何志强. 电流互感器自动化检定系统二次负荷测试及分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(2): 114-117.
DING Tao, SHAO Huailiang, HE Zhiqiang. Secondary load test and analysis of automatic verification system for current transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(2): 114-117.
- [22] 龚贤夫, 周浩, 戴攀, 等. 一种输电线路大功率取能电源的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 124-128, 134.
GONG Xianfu, ZHOU Hao, DAI Pan, et al. A design of high-power supply installed on transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 124-128, 134.
- [23] 吕艳玲, 赵玉林, 徐建华, 等. 基于固态继电器的配电变压器自动稳压装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 74-77.
LÜ Yanling, ZHAO Yulin, XU Jianhua, et al. Automatic voltage stabilizing device of electric transformer based on solid state relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 74-77.
- [24] 刘铮, 樊绍胜, 胡劭睿. 基于阻抗匹配的输电线路在线取能方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6867-6876, 7100.
LIU Zheng, FAN Shaosheng, HU Jierui. Research on online energy acquisition method for transmission lines based on impedance matching[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6867-6876, 7100.
- [25] 樊绍胜, 钟洪亮, 岳舟. 基于阻抗自适应调整的输电线路取能装置稳定取能方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5348-5360.
FAN Shaosheng, ZHONG Hongliang, YUE Zhou. Stable energy acquisition method of transmission line energy acquisition device based on impedance adaptive adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5348-5360.
- [26] 赵洪山, 马利波, 赵阳, 等. 基于 CT 的交流电源及其控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(15): 32-39.
ZHAO Hongshan, MA Libo, ZHAO Yang, et al. Research on AC power supply and its control strategy based on CT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 32-39.
- [27] 詹坤, 高广德, 李建忠, 等. 基于定频 PWM 稳压的电流互感器取能电源设计方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(12): 45-51.
ZHAN Kun, GAO Guangde, LI Jianzhong, et al. Design method of current transformer energy extracting power supply based on constant frequency PWM voltage stabilization[J]. Smart Power, 2021, 49(12): 45-51.
- [28] 李光竹, 詹坤, 高广德, 等. 基于 PWM 自适应稳压电流互感器的取能电源设计方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 57-63.
LI Guangzhu, ZHAN Kun, GAO Guangde, et al. Design method of draw-out power supply based on PWM adaptive voltage-stabilized current transformer[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 57-63.
- [29] 张鹏, 王玮, 徐丙垠, 等. 基于自适应功率输出控制的电流互感器取能电源设计方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 194-200.
ZHANG Peng, WANG Wei, XU Bingyin, et al. Design method of energy-gaining power supply for current transformer based on self-adaptive power output control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 194-200.
- [30] EPCOS. Ferrites and accessories[M]. Data Book, 2007.

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2024-04-12

作者简介:

詹坤(1995—), 男, 通信作者, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为电气工程及其自动化输电线路; E-mail: 2326496044@qq.com

高广德(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电气工程及其自动化输电线路。E-mail: 3070473809@qq.com

(编辑 许威)