

基于阻抗优化的电缆环流抑制装置参数设计

陈晓儒¹, 黄龙毅¹, 杨明嘉², 赖胜杰², 池梓斌², 夏成军^{2,3}

(1. 广东电网有限责任公司 惠州供电局, 广东 惠州 516001;

2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

3. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东 广州 510663)

摘要:针对现有高压电缆金属护套环流抑制装置投入和退出缺乏灵活性, 确定抑制阻抗数值时未考虑护套感应电压超标、功率损耗过大等问题, 设计了一种能根据现场情况对护套环流抑制阻抗进行动态投入或退出的环流抑制装置。首先, 阐述了该抑制装置的结构和动作流程; 接着分析了抑制阻抗分别为纯电阻、纯电感和电阻电感组合三种类型时护套环流、感应电压和护套损耗的变化特性; 在此基础上, 建立优化模型求解满足护套环流和感应电压要求时使功率损耗最小的最佳阻抗值, 基于最佳阻抗值对晶闸管等元件的参数进行配置。结果表明, 所提方法可以得到满足工程要求的电缆抑制阻抗最优值, 实现良好的环流抑制效果。

关键词: 高压电缆; 护套环流; 抑制装置; 最佳阻抗; 优化模型; 参数配置

中图分类号: TM247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24735

Parameter Design of Cable Circulation Suppression Device Based on Impedance Optimization

CHEN Xiaoru¹, HUANG Longyi¹, YANG Mingjia², LAI Shengjie², CHI Zibin², XIA Chengjun^{2,3}

(1. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Limited Liability Company, Huizhou 516001,

Guangdong, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. Guangdong Province New Energy

Power System Intelligent Operation and Control Enterprise Key

Laboratory, Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: In view of the lack of flexibility in the input and exit of the current metal sheath loop suppression device for high voltage cables, the problems such as excessive induced voltage of the sheath and excessive power loss were not considered when determining the suppression impedance value, a loop suppression device was designed which could dynamically input or exit the loop suppression impedance of the sheath according to the field conditions. Firstly, the structure and operation flow of the suppression device was described. Then, the variation characteristics of sheath circulation, induced voltage and sheath loss when the suppression impedance was pure resistance, pure inductance and combined resistance inductance were analysed. On this basis, an optimization model was established to solve the optimal impedance value which can minimize the power loss when meeting the requirements of sheath circulation and induced voltage. Based on the optimal impedance value, the parameters of thyristors and other components were configured. The results show that the proposed method can obtain the optimal value of cable suppression impedance that meets the engineering requirements, and achieve a good circulation suppression effect.

Key words: high voltage cable; sheath circulation; suppression device; optimum impedance; optimization model; parameter configuration

高压电缆具有占地面积小、供电可靠性高、对环境破坏小等优点, 在城市电网的建设中逐渐获得广泛的应用, 但电缆分段不均匀、电缆排列

方式不同等因素均会造成金属护套感应电压不平衡^[1], 进而产生护套环流, 影响电缆线路稳定运行, 甚至造成安全事故^[2-3]。按照南方电网公司

基金项目: 南方电网公司科技项目(031300KK52200003)

作者简介: 陈晓儒(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: 13927334330@139.com

《电力设备预防性试验规程》规定,110 kV及以上单回路敷设电缆线路的外护层电流,一般不大于电缆负荷电流值的10%^[4]。当未采取操作人员任意接触金属护套的安全措施时,感应电压不能超过人体的安全阈值50 V^[5]。为了抑制护套环流,工程中通常选择在电缆护套接地前串入阻抗,但串接阻抗的同时,若抑制阻抗数值过大,护套感应电压可能超过规定值,威胁运行人员安全,且长时间运行在护套上产生过大损耗,存在破坏护套绝缘、影响电缆线路的安全稳定运行的风险^[6]。因此,在护套上串接阻抗抑制环流时,满足降低护套感应电压和抑制环流要求的同时必须考虑接入阻抗在护套上产生的功率损耗,防止护套损耗过大影响正常运行。

为了抑制电缆护层环流,学者们提出了不同的抑制方法。文献[7]提出串接抑制器进行限流;文献[8]将电抗器用于回路减小环流;文献[9]提出在电缆最后端护层上连接补偿装置限制护层电流;文献[10]采用在护层接地回路串接电感装置的方式对护层环流进行补偿;文献[11]提出基于电磁耦合实现串联阻抗的环流抑制措施;文献[12-13]通过增设电阻装置、加装电感器、串联阻抗等方法抑制电缆护套环流;文献[14]提出采用串接电阻、串接电感、串接接地电阻和串接补偿电感的组合模式对电缆接地环流进行抑制,具有显著效果。

现有文献提出的环流抑制装置多采用在电缆护套终端串接抑制阻抗来抑制环流,无论环流是否超标,都直接将抑制阻抗接入护套终端,缺乏灵活性。当护套环流未超标时,接入护套环流抑制阻抗会造成电能损耗和发热消耗,影响电缆的使用寿命;当负荷电流异常增大或出现短路等情况时,护套感应电压会超过相关规程的允许值,对人身安全造成威胁,此时需要切除抑制阻抗,让金属护套直接接地。此外,在确定抑制阻抗投入的数值时未考虑护套感应电压超标和护套回路功率损耗过大等问题,投入阻抗数值过大,护套感应电压增大过多;投入阻抗数值过小,环流超标问题未解决,因此有必要综合考虑多种因素确定最优阻抗值。

针对以上问题,本文设计了带有自动投切功能的护套环流抑制装置,根据现场情况对抑制阻抗进行动态投切,并对其相关参数的设计进行了详细分析。基于电缆交叉互联接地环流计算模

型分析金属护套分别串接纯电阻、纯电感、电阻电感组合三种方式下的环流抑制效果、感应电压变化和阻抗产生功率损耗,建立优化模型计算分析得到考虑感应电压和护套回路功率损耗的最佳阻抗值,在此基础上完成对开关管等元件的参数设计。

1 带自动投切功能的护套环流抑制装置

图1为高压电缆护套交叉互联示意图,当护套环流过大时,在每一相电缆护套末端串接阻抗抑制环流,装置示意图如图2所示。

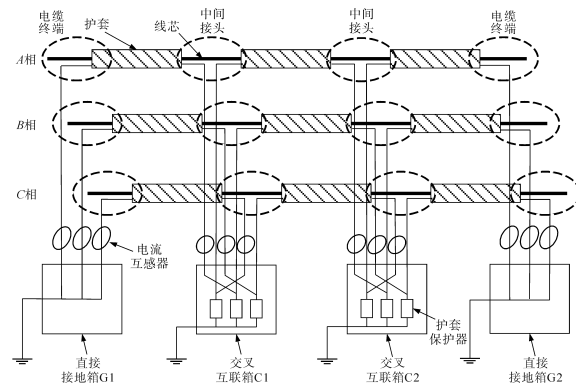


图1 电缆护套交叉互联接地示意图

Fig.1 Schematic diagram of cable sheath cross interconnection grounding

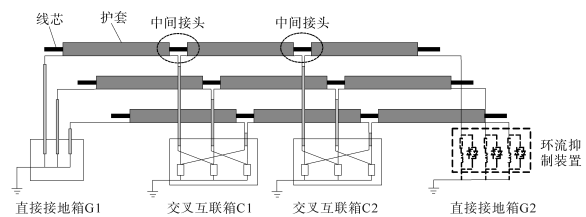


图2 交叉互联电缆串接环流抑制装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of cross-connected cable tandem circulation suppression device

为了满足电缆系统的环流比和感应电压工程要求,设计如图3所示的环流抑制装置。抑制阻抗由电阻和电感组成,串接于护套终端与接地极之间,起到抑制护套环流和减小护套感应电压的作用;抑制阻抗需要在满足条件时接入护套终端,在抑制阻抗两端并联两个可控制其通断的晶闸管(开关管),开关管反向并联,由主控制回路发出信号控制其是否投入;两个开关管并联一个氧化锌阀片、串联一个快速熔断器,以实现过压保护和过流保护。抑制阻抗的投切逻辑如图4所示。

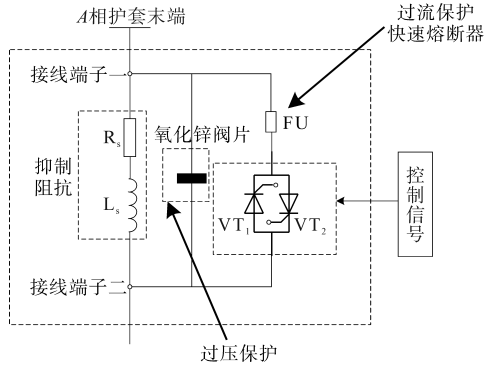


图3 单相环流抑制装置设计图

Fig.3 Design of single-phase circulation suppression device

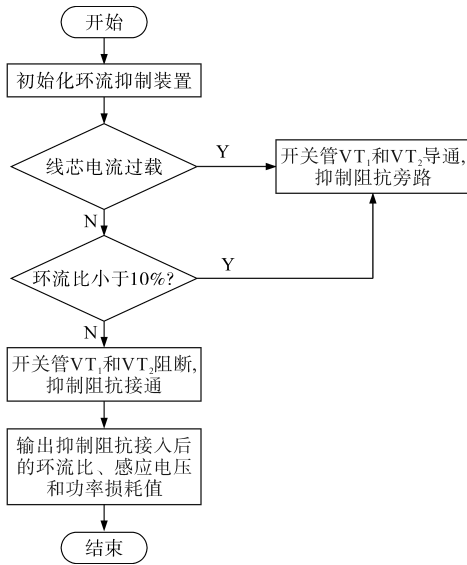


图4 抑制阻抗的投切逻辑

Fig.4 Impedance rejection switching logic

图4中,起始时,判断线芯电流是否过载,若线芯电流超过正常运行范围,则主控制模块给开关管 VT_1, VT_2 施加导通信号,保持每半个周波导通开关管 VT_1 和 VT_2 ,开关管持续导通,抑制阻抗被旁路。若线芯电流处于正常运行范围,判断电缆首末两端的电流测量装置采集的护套环流和线芯电流的比值(环流比)是否超过10%,当环流比 $<10\%$ 时,同样给开关管 VT_1, VT_2 施加导通信号,将抑制阻抗旁路,避免抑制阻抗给护套产生过多能耗;当环流比 $\geq 10\%$ 时,停止发出导通信号,将抑制阻抗接入护套回路,使得环流比处于合理大小范围内。

抑制阻抗能否降低护套环流的同时确保护套感应电压不超标,阻抗数值的大小起决定作用。抑制阻抗数值过小,对环流的抑制作用不够强,环流比依旧大于10%;抑制阻抗数值过大,可能增大护套感应电压,对运行人员安全造成伤害,同时,过大的电阻可能带来更大的护套功率

损耗,长时间运行下可能造成电缆护套发热引起缺陷或破损。因此,将抑制阻抗接入护套回路前,需要根据当前工况设计符合已知运行工况的最优阻抗,以满足工程应用要求。

2 电缆护套串接阻抗运行特性分析

为了研究抑制阻抗对环流的抑制作用、对感应电压的影响和在护套上产生的功率损耗变化,本文通过仿真计算模型,对电缆护套满足接入抑制阻抗条件时的情况进行分析。图5为交叉互联电缆满足环流抑制阻抗投入条件时,阻抗串接入护套回路后的等值电路,其中, R_{d1}, R_{d2} 为交叉互联首、末端接地电阻, R_e 为大地漏电阻; $R_1+jX_1, R_2+jX_2, R_3+jX_3$ 为三段电缆护套中的自阻抗; R_s+jX_s 为串联接入的环流抑制阻抗; $U_{SAi}, U_{SBi}, U_{SCi} (i=1, 2, 3)$ 为三段电缆护套回路的环流在不同区段上产生的感应电压; $U_{TAi}, U_{TBi}, U_{TCi} (i=1, 2, 3)$ 为三段电缆线芯电流在不同区段上产生的感应电压; I_{SA}, I_{SB}, I_{SC} 为A,B,C三相金属护套环流。

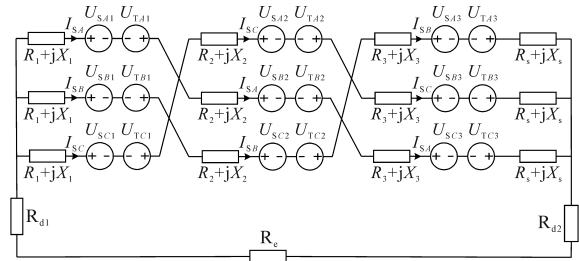


图5 电缆护套环流计算等值电路

Fig.5 Cable sheath circulation calculation equivalent circuit

根据图5所示的等值电路及上述各参数的含义,可通过回路电流法列写如下方程组^[15]:

$$\begin{cases} U_{TA1} + U_{TB2} + U_{TC3} = [(R_1 + R_2 + R_3) + j(X_1 + X_2 + X_3) + (R_s + jX_s)] I_{SA} + (R_{d1} + R_{d2} + R_e) \cdot (I_{SA} + I_{SB} + I_{SC}) + U_{SA1} + U_{SB2} + U_{SC3} \\ U_{TB1} + U_{TC2} + U_{TA3} = [(R_1 + R_2 + R_3) + j(X_1 + X_2 + X_3) + (R_s + jX_s)] I_{SB} + (R_{d1} + R_{d2} + R_e) \cdot (I_{SA} + I_{SB} + I_{SC}) + U_{SB1} + U_{SC2} + U_{SA3} \\ U_{TC1} + U_{TA2} + U_{TB3} = [(R_1 + R_2 + R_3) + j(X_1 + X_2 + X_3) + (R_s + jX_s)] I_{SC} + (R_{d1} + R_{d2} + R_e) \cdot (I_{SA} + I_{SB} + I_{SC}) + U_{SC1} + U_{SA2} + U_{SB3} \end{cases} \quad (1)$$

护套上的感应电压等于线芯电流和护套环流在护套上产生的感应电压总和,线芯电流和护套环流在护套上产生的感应电压分别为(以其中一回为例)

$$\begin{cases} U_{TA1} = -2 \times 10^{-7} j\omega(I_B \ln \frac{S_{AB}}{R_{av}} + I_C \ln \frac{S_{AC}}{R_{av}})L_1 \\ U_{TB2} = -2 \times 10^{-7} j\omega(I_A \ln \frac{S_{BA}}{R_{av}} + I_C \ln \frac{S_{BC}}{R_{av}})L_2 \\ U_{TC3} = -2 \times 10^{-7} j\omega(I_A \ln \frac{S_{CA}}{R_{av}} + I_B \ln \frac{S_{CB}}{R_{av}})L_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} U_{SA1} = 2 \times 10^{-7} j\omega(I_{SB} \ln \frac{D_e}{S_{AB}} + I_{SC} \ln \frac{D_e}{S_{AC}})L_1 \\ U_{SB2} = 2 \times 10^{-7} j\omega(I_{SB} \ln \frac{D_e}{S_{BC}} + I_{SC} \ln \frac{D_e}{S_{AB}})L_2 \\ U_{SC3} = 2 \times 10^{-7} j\omega(I_{SB} \ln \frac{D_e}{S_{AC}} + I_{SC} \ln \frac{D_e}{S_{BC}})L_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_A, I_B, I_C 分别为 A, B, C 三相线芯电流; R_{av} 为金属护套的几何平均半径; D_e 为大地等值深度; S_{xy} 为 x 相与 y 相电缆线芯之间的距离; $L_i (i=1, 2, 3)$ 为第 i 段电缆的长度。

其余感应电压可以类似得出。

抑制阻抗接入后,在电缆护套上产生的损耗功率为

$$P_s = (R_1 + R_2 + R_3 + R_s)I_{sx}^2 \quad (4)$$

式中: $I_{sx} (X=A, B, C)$ 为护套上流过的环流。

通过式(1)~式(4),可以计算抑制阻抗接入护套回路后的护套环流、感应电压和阻抗功率损耗。

2.1 金属护套串接电阻

金属电缆护套串接不同阻值电阻时,不同回路的护套环流与负荷电流之比和不同电缆区段护套的感应电压如图6所示,环流和电压变化平稳后护套产生的损耗功率和感应电压如图7所示。

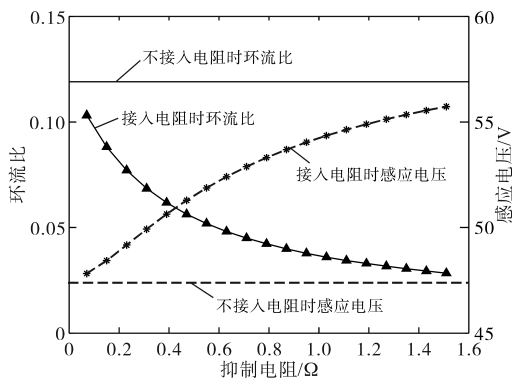


图6 不同电阻下电缆护套环流比和感应电压
Fig.6 Cable sheath circulation ratio and induced voltage under different resistance

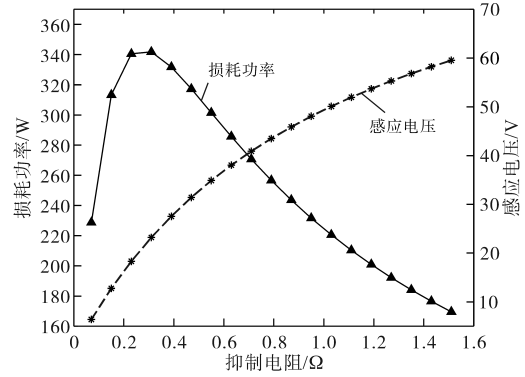


图7 不同电阻下电缆护套损耗功率和感应电压
Fig.7 Cable sheath loss power and induced voltage under different resistance

由图6可知,随着护套接入电阻增大,环流比减小,由0.12下降至0.065,但最大感应电压增大,由47.69 V升至50.104 V,已超过人体安全阈值。电缆护套接入电阻对电缆线芯电流的影响几乎可忽略不计,线芯电流在护套上产生的感应电压基本保持不变,当护套接入电阻阻值增大时,护套环流减小,护套环流在护套上产生的感应电压数值减小,环流产生的感应电压与线芯电流产生的感应电压矢量和增大,因此护套感应电压数值增大。

由图7可知,随着接入电阻阻值增大,护套产生的功率损耗先升高后降低,由228.72 W逐渐增大到341.76 W,然后逐渐下降至169.55 W。电阻上的损耗功率是串接电阻和环流的函数,其中电阻值逐渐增大,环流值逐渐减小,使得功率呈现先增大后减小的趋势,存在一个电阻值使功率损耗最大。

因此,接入纯电阻降低环流比时,为了保证护套感应电压不超过安全阈值且接入电阻后产生的护套损耗尽可能小,应考虑接入0.1~0.3 Ω的电阻。

2.2 金属护套串接电感

金属电压护套串接不同电感时,不同回路护套环流与负荷电流之比和不同电缆区段护套感应电压如图8所示。

由图8可知,不同电感接入前,环流比降低,感应电压升高。和图6电阻的作用相比,在阻抗值变化范围相同时,电感对环流的抑制作用相对电阻较弱,增强护套感应电压的作用更大。

2.3 金属护套串接阻抗

在不同的电感下组合不同的电阻,得到不同阻抗组合下的环流比变化如图9所示,接入不同

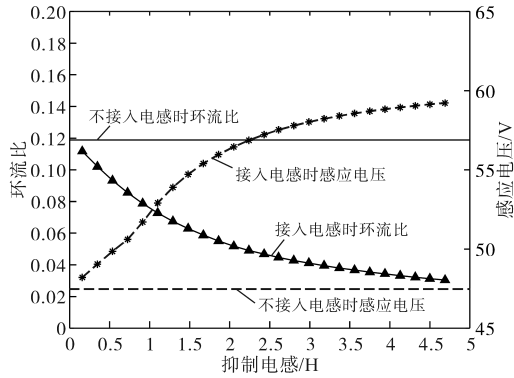


图8 不同电感下电缆护套环流比和感应电压
Fig.8 Cable sheath circulation ratio and induced voltage under different inductances

阻抗组合后的感应电压变化如图10所示,接入不同阻抗组合后的护套损耗和损耗占比如图11所示。

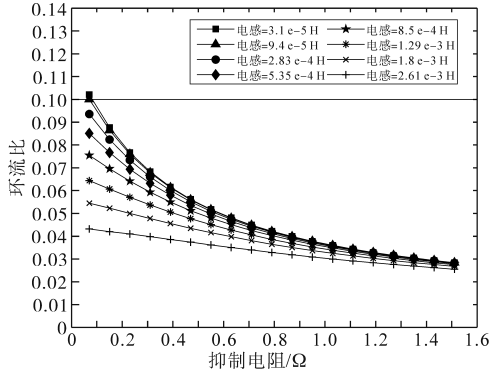


图9 不同阻抗组合下电缆护套环流比
Fig.9 Cable sheath circulation ratio under different impedance combinations

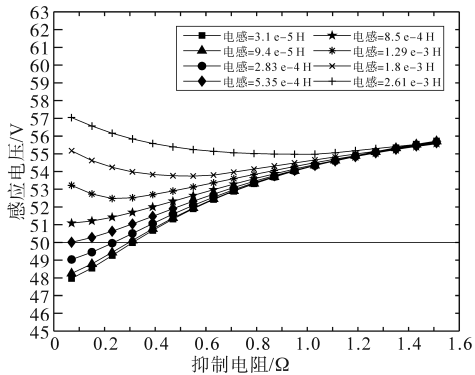


图10 不同阻抗组合下电缆护套感应电压
Fig.10 Induced voltage by cable sheath under different impedance combinations

由图9可知,电阻变化范围相同时,电感的阻抗值越大,环流比下降越多。

由图10可知,同一电感下,随着电阻阻值增大,护套上的感应电压先降低后升高。在电感阻抗值较小时,电感产生的反电势相比护套环流产生的护套感应电压较小,护套环流产生的总的感

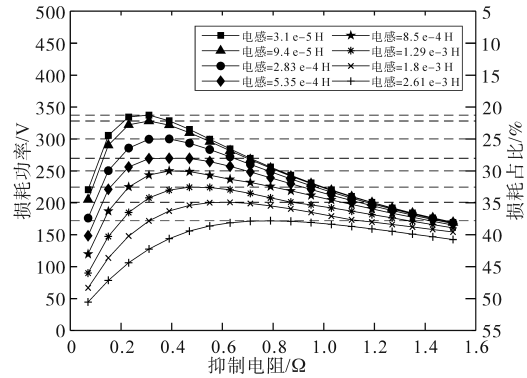


图11 不同阻抗组合下电缆护套损耗功率和损耗占比
Fig.11 Cable sheath loss power and loss ratio under different impedance combinations

应电压减小,线芯电流产生的感应电压不变,护套上的总感应电压上升;在电感阻抗值较大时,电感产生的反电势和护套环流产生的护套感应电压相互抵消,甚至更大,令护套上的总感应电压下降。

由图11可知,不同阻抗组合下的电缆护套损耗均先增大后减小,损耗占比最大值随电阻阻值增大而增大。由式(1)和式(4)可知,功率是电阻和护套环流的函数,当串接电阻和护套电阻接近时,损耗功率达到最大值。

综上,为了尽可能减小护套环流,应同时串接电阻和电感;为了减小护套上产生的总感应电压,应串接较小的电感降低反电势,串接较大的电阻降低护套环流产生的护套感应电压;为避免损耗功率处于最大值,应确保串接的阻抗使得损耗功率随电阻的变化处于下降趋势,降低损耗功率在护套总损耗中的占比。基于以上要求,需要建立优化模型计算最佳阻抗值。

3 环流抑制阻抗最优值确定及相关参数配置

由第2节分析知,同时投入电阻和电感可以取得最好的环流抑制效果,且存在使环流比小于10%、感应电压小于50V、抑制阻抗产生功率损耗最小的最优阻抗值。为了确保抑制阻抗能够在需要满足工程应用要求时投入最佳阻抗值,需要接入控制抑制阻抗投切的开关管并配置开关管的参数,开关管参数的配置需要和抑制阻抗的投切过程相结合。

当开关管导通、抑制阻抗被旁路时,开关管满足条件如下:

$$\begin{cases} \frac{r_m}{R_s} \leq 0.001 \\ I_{on} \gg I_s \\ I_{on} \leq I_T \\ U_s \leq U_{TM} \end{cases} \quad (5)$$

式中: r_m 为开关管内阻; R_s 为可自动调节档位变化的抑制电阻; I_{on} 为开关管导通时流过开关管的电流; I_s 为流过抑制阻抗的电流; I_T 为开关管导通时的通态平均电流; U_s 为抑制阻抗两端电压; U_{TM} 为开关管导通时的通态峰值电压。

当开关管关断、抑制阻抗接入护套回路时,开关管满足条件如下:

$$\begin{cases} \frac{r_m}{R_s} \geq 1000 \\ I_{off} \ll I_s \\ I_{off} \leq I_{DRM} \\ U_s \leq U_{DRM} \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_{off} 为开关管关断时流过开关管的电流; I_{DRM} 为开关管关断时的断态重复峰值电流; U_{DRM} 为开关管关断时的断态重复峰值电压。

氧化锌阀片需要在电缆护套终端产生过电压时保护开关管,其电压参数应满足:

$$\begin{cases} U_r \geq KU_t \\ U_t \geq 1.4U_m/\sqrt{3} \\ U_C \geq U_m/\sqrt{3} \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_r 为额定电压; U_t 为暂时过电压; K 为切除故障时间系数,本文取1; U_m 为最高工作电压; U_C 为持续运行电压。

熔断电阻需要在开关管支路流过大电流时断开电路,其额定电流应大于开关管流过的最大电流,额定电压应大于开关管两端可能出现的最大电压,需要有一定的过载能力,在超过有限过载电流时及时断开,其参数应满足:

$$\begin{cases} I_n \geq I_{on} \\ U_n \geq U_{DRM} \\ I_{WD} \leq 1.2I_n \\ I_{RD} \geq 1.8I_n \end{cases} \quad (8)$$

式中: I_n 为熔断器额定电流; U_n 为熔断器额定电压; I_{WD} 为熔断器最小开断电流; I_{RD} 为熔断器最大未断电流。

本文基于遗传算法建立计算模型^[16-17],以满足环流比<10%、感应电压<50 V时的阻抗值对应的功率损耗作为初始值,求解满足约束条件下的最佳阻抗值。基于遗传算法的计算模型的优化

目标是满足工程条件下串接在护套上的阻抗产生的功率损耗,即

$$\min P_s = (R_1 + R_2 + R_3 + R_x)I_s^2 \quad (9)$$

考虑取得最好的环流抑制效果,建立约束条件如下:

$$\begin{cases} R_{\min} \leq R_x \leq R_{\max} \\ L_{\min} \leq L_x \leq L_{\max} \\ I_s = \max \{ I_{sA}, I_{sB}, I_{sC} \} \\ U_{A1} = U_{TA1} + U_{SA1} \\ U_{B2} = U_{TB2} + U_{SB2} \\ U_{C3} = U_{TC3} + U_{SC3} \\ U_{B1} = U_{TB1} + U_{SB1} \\ U_{C2} = U_{TC2} + U_{SC2} \\ \text{s.t.} \begin{cases} U_{A3} = U_{TA3} + U_{SA3} \\ U_{C1} = U_{TC1} + U_{SC1} \\ U_{A2} = U_{TA2} + U_{SA2} \\ U_{B3} = U_{TB3} + U_{SB3} \\ U_A = \max \{ U_{A1}, U_{A2}, U_{A3} \} \\ U_B = \max \{ U_{B1}, U_{B2}, U_{B3} \} \\ U_C = \max \{ U_{C1}, U_{C2}, U_{C3} \} \\ \max \{ I_{sA}/I_A, I_{sB}/I_B, I_{sC}/I_C \} \leq 0.1 \\ \max \{ U_A, U_B, U_C \} < 50 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_A, U_B, U_C 为三相护套上的感应电压总和。

为了验证计算方法的有效性,通过PSCAD软件搭建电缆交叉互联接地的仿真模型,仿真模型中的电缆型号为YJLW03 64/110 630 mm²,结构参数如表1所示。设定电缆全长1.9 km,交叉互联的三段电缆长度分别为0.5 km,0.6 km和0.8 km,敷设方式为水平排列,每相电缆之间间隔为0.2 m,电缆埋地深度为0.5 m,接地电阻为0.5 Ω,单芯电缆仿真参数模型如图12所示。建立电缆线路模型时采用PSCAD中考虑频率特性的相域模型,仿真步长设为3.0 μs。

表1 YJLW03 64/110 630 mm²型单芯电缆结构参数

Tab.1 YJLW03 64/110 630 mm² type single core cable structure parameters

结构	内径/mm	外径/mm
导体	0.0	15.0
内半导体层	15.0	15.8
绝缘层	15.8	35.3
外半导体层	35.3	36.1
铝护套	36.1	44.0
外护套	44.0	47.5

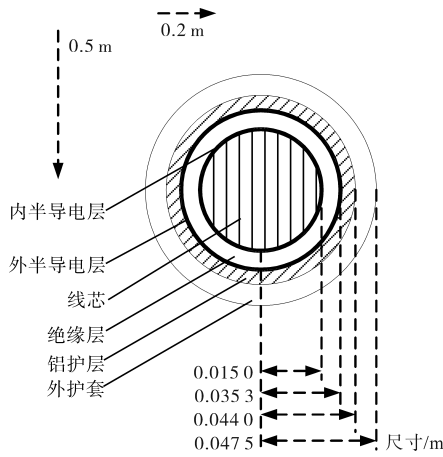


图12 电缆仿真参数模型

Fig.12 Cable simulation parameter model

在表1参数设置下的电缆环流计算模型中,串接 $0.187\ \Omega$ 的阻抗时,环流比为 0.092 ,感应电压为 $49.88\ \text{V}$,损耗功率最小值为 $20.65\ \text{W}$,损耗占比相对其他阻抗组合最小,已满足环流比和感应电压的工程应用要求。

根据最优阻抗值求解得到的相应的开关管、氧化锌阀片和熔断电阻配置参数如表2和表3所示。在该计算模型中,选用表2和表3所示参数范围内的开关管用于控制抑制阻抗投切,氧化锌阀片和熔断电阻用于保护开关管。

表2 满足抑制阻抗投切条件的开关管配置参数

Tab.2 Configuration parameters of switch tubes that meet the conditions for suppressing impedance switching

内阻 $r_m/m\Omega$	通态平均电流 I_T/A	通态峰值电压 U_{TM}/mV
$0.5 \leq r_m \leq 2.9$	$1.39 \leq I_T \leq 1.96$	$8.74 \leq U_{TM} \leq 42.3$
断态重复峰值电流 I_{DRM}/mA		断态重复峰值电压 U_{DRM}/V
$13.5 \leq I_{DRM} \leq 19.4$		$68.01 \leq U_{DRM} \leq 70.68$

表3 满足抑制阻抗投切条件的氧化锌阀片和熔断电阻配置参数

Tab.3 Zinc-oxide valve disc and fuse resistance configuration parameters that meet the conditions of inhibiting impedance cutting

氧化锌阀片		熔断电阻			
暂时过电压 U_l/kV	持续运行电压 U_C/kV	额定电流 I_n/A	额定电压 U_n/A	最大未断电流 I_{WD}/A	最小开断电流 I_{KD}/A
$U_l \geq 88.91$	$U_C \geq 63.5$	$I_n \geq 1.96$	$U_n \geq 70$	$I_{WD} \leq 2.352$	$I_{KD} \geq 3.528$

通过上述计算模型,可以对存在环流和感应电压超标问题的电缆系统设计满足其环流抑制要求的环流抑制装置参数,根据已知的电缆系统运行数据,计算满足工程应用要求的最佳阻抗值和实现环流抑制装置投切的开关管等元件参数。

4 结论

本文针对现有电缆护套环流抑制方式不够灵活和抑制阻抗接入护套后感应电压超标、功率损耗过大的问题,设计了带有自动投切功能的环流抑制装置并提出求解最优阻抗值计算模型,经过计算和分析得到以下结论:

1)设计的环流抑制装置可以灵活地抑制环流,减小抑制阻抗始终投入造成的功率损耗;

2)通过分析电缆护套串接不同阻抗类型时护套环流、感应电压和功率损耗的变化特性可知,同时接入电阻和电感可以取得最好的环流抑制效果;

3)提出的护套环流抑制阻抗最优值求解模型,可以求解满足环流比、感应电压和功率损耗要求的最佳阻抗值,配置不同工况下存在环流超标问题的电缆系统的环流抑制装置参数,对电缆护套环流抑制装置的设计有一定的参考意义。

参考文献

[1] 詹承海. 电缆排列方式对金属护套感应电压的影响[J]. 电气技术与经济, 2018(4): 14-16.
ZHAN Chenghai. Influence of cable arrangement on induced voltage of metal sheath[J]. Electrical Equipment and Economy, 2018(4): 14-16.

[2] 王华楠,王霞,余栋,等. 110 kV 电缆中间接头的合闸过电压仿真研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 127-134.
WANG Huanan, WANG Xia, YU Dong, et al. Study on closing overvoltage simulation of 110 kV cable intermediate joint[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 127-134.

[3] 惠宝军,傅明利,刘通,等. 110 kV 及以上电力电缆系统故障统计分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(12): 44-50, 67.
HUI Baojun, FU Mingli, LIU Tong, et al. Statistical analysis on failures of 110 kV and above power cable system[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(12): 44-50, 67.

[4] 金作林. 城市高压长电缆线路护层过电压与环流及其抑制措施研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
JIN Zuolin. Study on overvoltage and circulation of urban high-voltage long cable line sheaths and their restraining measures [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 额定电压 110 kV ($U_m=126\ \text{kV}$) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件第 2 部分: 电缆: GB/T 11017.2—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power cables with cross-linked polyethylene insulation and their accessories

- for rated voltage of 110 kV ($U_m=126$ kV)—part 2: power cables: GB/T 11017.2-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [6] 李建儒. 单芯电力电缆护层接地及护套损伤危害性分析[J]. 电气化铁道, 2011, 22(2): 29-31.
LI Jianru. Single core power cable sheath earthing and analysis of harmfulness of sheath damage[J]. Electric Railway, 2011, 22(2): 29-31.
- [7] 王珂, 郭剑. 高压电缆环流抑制器设计及应用[J]. 电工材料, 2017(4): 37-40, 44.
WANG Ke, GUO Jian. Design and application of HV power cable circulating current suppressor[J]. Electrical Engineering Materials, 2017(4): 37-40, 44.
- [8] 郑光禄, 张涛. 110 kV 单芯高压电缆护套环流抑制措施[J]. 船电技术, 2015, 35(10): 13-16, 21.
ZHENG Guanglu, ZHANG Tao. Control method for ring current of 110 kV single core high voltage cable sheath[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2015, 35(10): 13-16, 21.
- [9] 成健, 黎玉强, 刘文东, 等. 一种单芯电缆护层电压补偿与环流限制技术分析[J]. 通信电源技术, 2016, 33(1): 96-99.
CHENG Jian, LI Yuqiang, LIU Wendong, et al. Analysis on compensation of induced voltage and restrictions of circular current in the metal sheath high-voltage power cable[J]. Telecom Power Technologies, 2016, 33(1): 96-99.
- [10] 马宏忠, 李超群, 许高俊, 等. 电缆金属护层环流补偿装置设计[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 151-155.
MA Hongzhong, LI Chaoqun, XU Gaojun, et al. Design of compensation device for metal shield circulating current of power cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 151-155.
- [11] 赵昌鹏, 戴斌, 李贵山, 等. 高压单芯电力电缆金属护套环流抑制措施[J]. 吉林电力, 2014, 42(1): 45-48.
ZHAO Changpeng, DAI Bin, LI Guishan, et al. Sheath circulating current suppression method for high voltage single-core cables[J]. Jilin Electric Power, 2014, 42(1): 45-48.
- [12] 付柱霖. 论高压电缆护套环流分析及防范措施[J]. 通讯世界, 2014(7): 97-98.
FU Zhulin. Analysis of high voltage cable sheath circulation and preventive measures[J]. Telecom World, 2014(7): 97-98.
- [13] 李丰湘. 论高压电缆护套环流分析及防范措施[J]. 科学与财富, 2016(3): 528-528.
LI Fengxiang. Analysis of high voltage cable sheath circulation and preventive measures[J]. Science and Wealth, 2016(3): 528-528.
- [14] 王荣亮, 王浩鸣, 宗红宝, 等. 高压电缆金属护套接地环流平衡抑制方法分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 108-114.
WANG Rongliang, WANG Haoming, ZONG Hongbao, et al. Analysis of suppression method for grounding circular current in metal sheath of high-voltage cable[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11): 108-114.
- [15] 王波, 罗进圣, 黄宏新, 等. 220 kV 高压单芯电力电缆金属护套环流分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 141-145.
WANG Bo, LUO Jinsheng, HUANG Hongxin, et al. Analysis of circulating current in sheaths of 220 kV XLPE single-core cables[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 141-145.
- [16] 杨国华, 朱向芬, 周鑫, 等. 基于遗传算法的风电混合储能容量优化配置[J]. 电气传动, 2015, 45(2): 50-53.
YANG Guohua, ZHU Xiangfen, ZHOU Xin, et al. Hybrid energy storage capacity optimization for independent wind generation system based on genetic algorithm[J]. Electric Drive, 2015, 45(2): 50-53.
- [17] 程毕芸, 鲁海燕, 徐向平, 等. 求解旅行商问题的改进局部搜索混沌离散粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2016, 36(1): 138-142, 149.
CHENG Biyun, LU Haiyan, XU Xiangping, et al. Improved local-search-based chaotic discrete particle swarm optimization algorithm for solving traveling salesman problem[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(1): 138-142, 149.

收稿日期: 2022-10-28

修改稿日期: 2022-11-30