

单芯电缆金属屏蔽层谐波过电压抑制技术研究

陈涛¹, 武守远¹, 朱珂¹, 庞怀江², 鲁南²

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南, 250061; 2. 莱芜钢铁集团有限公司, 山东 济南, 250061)

摘要: 传统单芯电缆屏蔽层保护器只能抑制雷电和故障过电压, 无法解决谐波引起的屏蔽层感应过电压和谐振过电压问题。为此提出了一种单芯电缆屏蔽层泄放阻尼技术, 首先通过分析屏蔽层感应电压的产生机理, 建立了单芯电缆屏蔽层耦合模型; 然后在模型的基础上研究了谐波引起的感应过电压和谐振过电压问题, 进而提出了将电缆屏蔽层经泄放电容和阻尼电阻的串联回路接地来降低谐波引起的过电压的技术方案; 最后给出了泄放电容和阻尼电阻参数的选择方法。理论和仿真分析都验证了该技术的有效性。

关键词: 电缆; 屏蔽层; 感应电压; 谐振; 泄放阻尼技术

Research on harmonic overvoltage suppression technology in metal shielding layer of single-core cable

CHEN Tao¹, WU Shouyuan¹, ZHU Ke¹, PANG Huaijiang², LU Nan²

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Laiwu Steel Corporation, Jinan 250061, China)

Abstract: Traditional shielding layer protector of single-core cable can only suppress lightning and fault overvoltage, and can not solve the induced overvoltage and resonance overvoltage caused by harmonics. A discharge damping technology for shielding layer of single-core cable is proposed. Firstly, the coupling model of shielding layer is established by analyzing the mechanism of shielding layer induced voltage; then, the induced overvoltage and resonance overvoltage caused by harmonics are studied based on the model; furthermore, a technical scheme of reducing the overvoltage caused by harmonics by grounding the cable shielding layer through discharge capacitance and damping resistance in series is proposed; finally, the method of choosing parameters of discharge capacitance and damping resistance is given. Theoretical results, simulated analysis confirm effectiveness of this method.

Key words: cable; shielding layer; induced voltage; resonance; discharge damping technology

0 引言

目前, 35 kV及以上电压等级的电力电缆均为单芯电缆, 当电缆线芯施加电压或通过变电流时, 金属屏蔽层上会产生感应电压^[1]。针对负荷电流引起的工频过电压以及雷电、故障引

起的暂态过电压, 现场采用屏蔽层不同的接地方式以及传统屏蔽层保护器加以有效抑制。而在钢厂等谐波含量较多的场合, 谐波电流会在屏蔽层上产生额外感应电压, 且感应电压的大小与谐波频率相关, 含量小的高频谐波可能产

生较大的感应电压，因此谐波感应电压不可忽视；另外屏蔽层阻抗和对地电容也可能在谐波电流励磁下发生谐振，产生谐振过电压。

近年来，由于谐波引起的电缆屏蔽层温升热击穿、过电压击穿事故屡见不鲜^[2-3]。电缆屏蔽层随线路长度的增加分别采用两端接地、单端接地以及交叉互联接地方式^[4-5]，以实现屏蔽层感应过电压的抑制。而常被忽略的高次谐波产生的幅值与频率成正比的额外感应电压则有可能使后两种接地方式下的屏蔽层感应电压超标。传统屏蔽层保护器被广泛用于抑制雷电和故障引起的暂态过电压^[6-8]，但由于氧化锌组件的电压阈值远高于屏蔽层感应过电压的上限，因此难以降低谐波引起的屏蔽层感应过电压。文献[9]利用可拆卸的多段子保护器来降低起始动作电压，但若将起始动作电压设置过低，则可能使保护器长时间导通，屏蔽层持续通过较大环流，影响电缆载流量。文献[10-12]利用在屏蔽层终端加补偿电感产生反电动势的方法来降低屏蔽层电压，抑制屏蔽层电流。该方法思路新颖，但无法调节补偿电感上产生的感应电动势相位，因此补偿电感只能在某一特定的相位区间有效，在其他相位区间甚至可能起到相反的作用，尤其是在谐波频率下。

综上所述，屏蔽层的不同接地方式虽然能够有效抑制屏蔽层感应过电压，但由于没有考虑谐波感应电压，使得钢厂等存在大量高频谐波的场合虽然采用了相应的屏蔽层接地方式，将工频感应电压限制在合理范围内，但屏蔽层上总的感应电压仍然可能超过允许值；而采用屏蔽层保护器的方法仅能抑制雷电或故障等引起的瞬态高幅值过电压，通过安装补偿电感来抑制谐波过电压的效果也值得商榷。基于此，本文提出一种单芯电缆金属屏蔽层谐波过电压抑制技术，即将单端接地的屏蔽层不接地端或交叉互联方式换位后的互联端通过泄放电容和阻尼电阻的串联回路接地，降低了电缆正常运行过程中谐波引起的过电压，同时避免了

因泄放电容的接入而可能导致的谐振。并联氧化锌组件可以预防雷电和故障过电压，用作后备保护。理论和仿真分析都验证了该方法的有效性。

1 电缆屏蔽层耦合模型

单芯电缆导体被外面的金属屏蔽层包裹着，当线路运行时，导线带有一定的电压，且流过一定的负荷电流，电缆导体和屏蔽层之间存在静电感应和电磁感应现象，从而在屏蔽层上产生感应电压。静电感应是由导体和屏蔽层间的分布电容引起的；电磁感应则通过导体和屏蔽间的磁场效应实现能量传递。

1.1 静电感应电压

静电感应电压的产生从机理上是电场效应的作用。电缆导体中存在的运行电压使线路中分布着电荷，屏蔽层处于线路电荷所产生的电场之中，从而使屏蔽层上感应出一个与空间其他点的电位差，如图1a所示。图1中， C_A 为A相导体和屏蔽层间的分布电容； C_a 为A相屏蔽层对地电容。根据电路原理，屏蔽层上的静电感应电压等于 C_a 上的分压。

导体和屏蔽层间的分布电容 C_A 的表达式为^[13]

$$C_A = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{CS}}{\ln(d_{oa}/d_{ia})} \quad (1)$$

屏蔽层对地电容 C_a 的表达式为

$$C_a = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{SE}}{\ln(d_{ob}/d_{ib})} \quad (2)$$

式中， ϵ_0 为真空介电常数； ϵ_{CS} 、 ϵ_{SE} 分别为主绝缘材质、外护套的相对介电常数； d_{ia} 、 d_{oa} 分别为绝缘层的内径、外径； d_{ib} 、 d_{ob} 分别为外护套的内径、外径。

考虑三相电缆时A相电缆屏蔽层静电感应电路如图1b所示^[14]，A相屏蔽层上的感应电压为

$$U_s = \frac{U_A C_A + U_B C_B + U_C C_C}{C_A + C_B + C_C + C_a} \quad (3)$$

由式(3)可知，三相回路间耦合电容的不

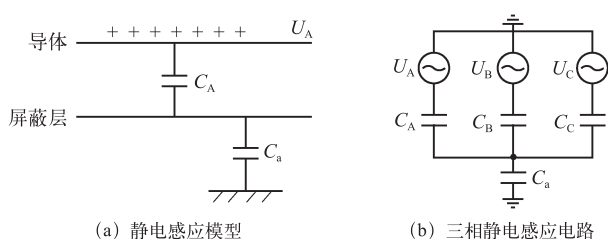


图1 静电感应模型和三相静电感应电路

Fig. 1 Electrostatic induction model and three-phase electrostatic induction circuit

对称是静电感应电压分量存在的原因。通常 C_A 远大于 C_B 和 C_C ，故可以忽略其他相导体对该相屏蔽层的静电影响；对于一端接地或两端接地的屏蔽层，同心导体对该相屏蔽层的静电感应电压分量也可忽略不计。

1.2 电磁感应电压

电磁感应电压的产生从机理上说是磁场感应的作用。导体中流过负荷电流，在周围产生磁场，金属屏蔽层处于变化的磁场中，产生感应电动势。同时，A相屏蔽层和相邻B、C相导体之间同样存在电磁感应现象，电磁感应模型如图2所示，采用互感来描述导体和金属屏蔽层之间的电磁耦合现象^[15]。

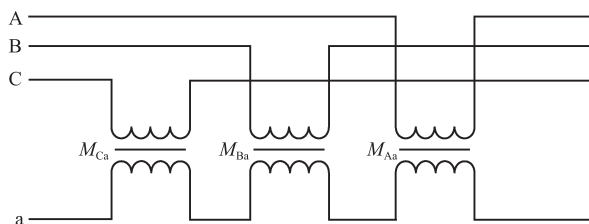


图2 电磁感应模型

Fig. 2 Electromagnetic induction model

屏蔽层和同相导体间的互感为

$$M_{Aa} = 2 \times 10^{-7} \times \left(\ln \frac{1}{D_s/2} \right) \quad (4)$$

屏蔽层和相邻相导体间的互感为

$$M_{Ba} = 2 \times 10^{-7} \times \left(\ln \frac{1}{S} \right) \quad (5)$$

式中， D_s 为屏蔽层直径； S 为相邻电缆之间的中心距。

由于电磁耦合效应，A相屏蔽层上会产生一个电磁感应电压，即

$$U_c = j\omega M_{Aa} I_A + j\omega M_{Ba} I_B + j\omega M_{Ca} I_C \quad (6)$$

由式(6)可知，回路间互感参数的不平衡是产生纵向电磁感应分量的根本原因，电磁感应电压与负荷电流的大小、频率及线路长度等有关。

1.3 单芯电缆屏蔽层耦合模型

由于交叉互联方式下屏蔽层上的最高感应电压在互联端与单端接地方式下感应电压的计算方式相同^[16]，本文提出的泄放阻尼技术（见第3节）对二者感应过电压的抑制效果也类似，故以下仅以采用单端接地方式的屏蔽层为例开展分析。忽略三相导体之间的静电和电磁影响，仅考虑电缆导体和屏蔽层间的静电感应和电磁感应现象，建立单端接地A相单芯电缆屏蔽层耦合模型，如图3所示。屏蔽层采用一端接地方式， R_g 为接地电阻； R_A 、 R_B 、 R_C 和 R_a 分别为三相导体和屏蔽层电阻； L_A 、 L_B 、 L_C 和 L_a 分别为三相导体和屏蔽层电感。

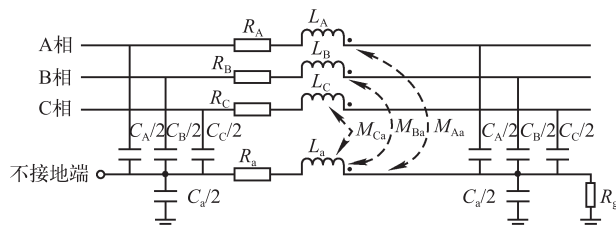


图3 单端接地单芯电缆屏蔽层耦合模型

Fig. 3 Shield model of single-ended ground single-core cable

2 谐波过电压

通常由于采用单端接地和交叉互联接地等措施，正常运行时屏蔽层上的工频感应电压不会对绝缘层造成较大损害^[17]。但对于钢厂等含有较多高次谐波场合，谐波电流也会在屏蔽层上产生感应电压，且感应电压的大小与谐波频率正相关；另外屏蔽层对地电容较大，屏蔽层电感和对地电容可能在某一高次谐波下发生谐振，并产生谐振过电压，威胁屏蔽层外绝缘。

由于屏蔽层采用一端接地方式，且导体与屏蔽层间的容抗较大，故忽略静电感应对屏蔽层的影响，根据图3得到A相屏蔽层等效电路，如图4所示。由于接地电阻 R_g 较小，忽略屏蔽层

右侧接地电容, R_d 为屏蔽层电阻和接地电阻等效;屏蔽层上的电压主要由电磁感应产生,用受控电压源 U_c 表示三相负荷电流在屏蔽层上产生的电磁感应电压; U 为屏蔽层不接地端电压。

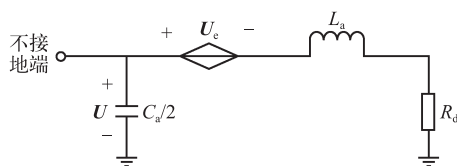


图4 A相屏蔽层等效电路
Fig. 4 Shield circuit of phase A

2.1 感应过电压

当负荷电流中含有谐波电流时,屏蔽层上的感应电压 U_c 等于三相负荷电流(包括谐波电流)在屏蔽层上产生的电磁感应电压和。根据式(6),某次谐波在屏蔽层上产生的电磁感应电压 U_{ck} 为

$$U_{ck} = j\omega_k M_{Aa} I_{Ak} + j\omega_k M_{Ba} I_{Bk} + j\omega_k M_{Ca} I_{Ck} \quad (7)$$

式中, I_{Ak} 、 I_{Bk} 和 I_{Ck} 分别为三相电流中第 k 次谐波; ω_k 为其角频率。

屏蔽层上总的电磁感应电压为

$$U_c = \sum_{k=1}^{k=n} U_{ck} \quad (8)$$

根据图4,屏蔽层不接地端电压等于三相负荷电流产生的电磁感应电压 U_c 在屏蔽层对地电容上的分压,得到屏蔽层不接地端的电压为

$$U = \sum_{k=1}^{k=n} [U_{ck} \left(\frac{1}{1 + j\omega_k (R_d + j\omega_k L_a) C_d/2} \right)] \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可知,各次谐波感应电压的大小与谐波频率正相关,含量小的高频谐波可能产生较大的感应电压;屏蔽层不接地端的电压等于基波和各次谐波电流在屏蔽层不接地端产生的电压和,工频电流在屏蔽层不接地端产生的电压在允许范围内,但加上谐波产生的电压后则有可能超过允许值。

2.2 谐振过电压

由于导体与屏蔽层间的容抗远大于屏蔽层对地容抗,因此在实际环境下,屏蔽层电感和其对地电容有可能在高频电磁感应电压下发生

谐振。根据图4,屏蔽层回路在电磁感应电压励磁下的输入阻抗 $Z(j\omega)$ 的表达式为

$$Z(j\omega) = R_d + j(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_d/2}) \quad (10)$$

根据串联电路发生谐振的条件, $\text{Im}[Z(j\omega)] = 0$,当角频率 ω_0 使得感抗和容抗相互完全抵消时,发生串联谐振,可求得谐振时的频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C_d/2}} \quad (11)$$

当屏蔽层电感和对地电容发生串联谐振时,电路中的电流为极大值,导致屏蔽层不接地端的电压被严重放大,远大于正常运行下的感应电压值,对屏蔽层外绝缘造成严重威胁。另外谐振电压的大小也与谐波电流的大小有关,谐波电流越大,屏蔽层电磁感应电压越大,谐振电压越高。

3 能量泄放阻尼技术

3.1 泄放阻尼技术

为解决电缆屏蔽层运行过程中谐波等原因引起的过电压问题,本文提出一种屏蔽层谐波过电压能量泄放技术。通过将屏蔽层经泄放电容和阻尼电阻的串联回路接地,降低电缆运行过程中谐波引起的感应电压,并打破屏蔽层参数和泄放电容构成的谐振条件,避免产生谐振过电压。同时将氧化锌组件与泄放阻尼回路并联,作为后备措施,限制瞬态高幅值过电压。泄放阻尼电路如图5所示。

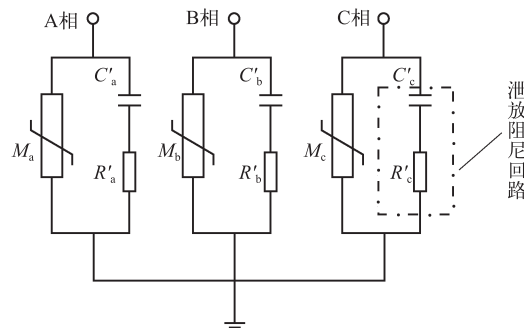


图5 泄放阻尼电路

Fig. 5 Discharge damping circuit

工频下单端接地方式的屏蔽层不接地端对地容抗远大于屏蔽层自身等效感抗,屏蔽层上的电磁感应电压主要加在屏蔽层对地电容上,泄放阻尼回路对降低工频电流在屏蔽层不接地端产生的电压效果不显著;但高频谐波对屏蔽层等效感抗和对地容抗的影响较大,通过增大屏蔽层接地电容可以有效降低谐波感应电压在屏蔽层不接地端的分压。根据图4和式(9),接入泄放电容 C'_a 后,屏蔽层不接地端电压变为

$$U = \sum_{k=1}^{k=n} [U_{ek} (\frac{1}{1+j\omega_k(R_d+j\omega_k L_a)(C'_a/2+C'_a)})] \quad (12)$$

定义泄放系数 Z 为

$$Z = |\frac{1}{1+j\omega_k(R_d+j\omega_k L_a)(C'_a/2+C'_a)}| \quad (13)$$

当泄放系数 $Z < 1$ 时,屏蔽层上的谐波感应电压在对地电容上的分压将会减小。从 Z 的表达式可以看出,当电缆参数确定时, Z 的大小主要与谐波频率和泄放电容 C'_a 相关。因此可以通过选取合适的 C'_a 降低谐波在屏蔽层不接地端的感应电压。

当谐波引起屏蔽层谐振时,泄放电容的接入会打破谐振条件,且抑制谐振过电压。此外,为防止因泄放电容的接入而导致谐振,在泄放电容支路串联阻尼电阻 R'_a ,同时采用氧化锌组件 M_a 构成过电压限压回路,并与泄放阻尼回路并联,避免雷电和故障过电压。

3.2 泄放电容 C'_a 的选择

1) 考虑泄放电容大小对于降低谐波在屏蔽层不接地端感应电压的效果。由于频率较低的谐波在屏蔽层上产生的感应电压低,对屏蔽层不接地端电压升高影响小,因此主要考虑泄放电容对高频谐波在屏蔽层不接地端感应电压的降低作用。采用第4节中的电缆型号,根据式(13)得到不同频率谐波和电缆长度下泄放系数随泄放电容大小变化的曲线,如图6所示。

由图6a可见,随着泄放电容的增加,泄放系数先增大后减小,在超过某个阈值后,泄放

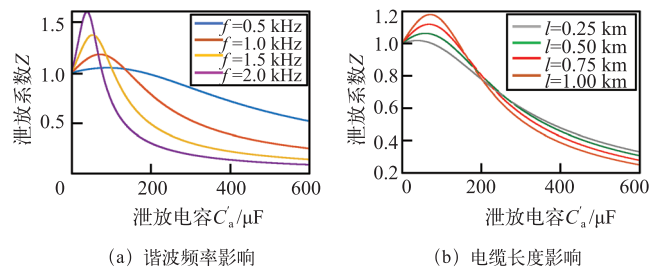


图6 谐波频率和电缆长度对泄放电容选择的影响

Fig.6 Influence of harmonic frequency and cable length on discharge capacitance selection

电容越大,对谐波在屏蔽层不接地端产生感应电压的抑制效果越好。另外谐波频率越高,所需的泄放电容越小。

图6b表明,在泄放电容值确定后,电缆长度对感应电压的抑制效果影响较小。结合图6a、b,对于示例中1 km以下的采用屏蔽层单端接地方式的电缆,选择大于400 μF的泄放电容,对谐波在屏蔽层不接地端的感应电压有良好的抑制效果。

2) 考虑并联泄放电容对屏蔽层电流的影响。屏蔽层终端经泄放电容接地后,屏蔽层对地电容增大,屏蔽层电流也增大。根据IEC 60287标准中屏蔽层电流与电缆载流量的计算公式^[18],为不影响导体载流量,泄放电容的取值上限应使得屏蔽层电流满足一个安全值 I_v ,即

$$I_a = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_k^2} < I_v \quad (14)$$

$$I_k = \frac{U_{ek}}{|R_d + j\omega_k L_a + 1/j\omega_k (C'_a/2 + C'_a)|} \quad (15)$$

式中, I_a 为A相屏蔽层电流有效值; U_{ek} 为第 k 次谐波在屏蔽层上产生的电磁感应电压有效值; I_k 为第 k 次谐波在屏蔽层上引起的电流有效值;泄放电容的上限值需要结合现场实测谐波情况加以确定。

3) 泄放电容的选择要避免引起屏蔽层参数和泄放电容发生谐振。根据图4,并联泄放电容后,增大了屏蔽层对地电容,改变了原屏蔽层

参数的谐振条件。基于式(11)谐振频率的表达式,得到泄放电容的选择应满足

$$C'_a \neq \frac{1}{(2\pi f_i)^2 L_a} - C_a/2 \quad (16)$$

式中, f_i 为引起谐振的第 i 次谐波电流的频率。

综上所述,可从上述三个方面确定所需的泄放电容值。但受相关参数变化的影响,屏蔽层参数发生谐振的频带可能较宽,导致按照前两个条件选取的泄放电容无法满足第三个条件,因此需要在泄放回路中串入阻尼电阻来防止因泄放电容的接入而引发的谐振。

3.3 阻尼电阻 R'_a 的选择

阻尼电阻的选择应考虑对泄放电容降低屏蔽层不接地端感应电压效果的影响,根据式(13),当泄放回路串入阻尼电阻 R'_a 时,泄放系数 Z 的表达式为

$$Z = \left| \frac{1}{1 + j\omega_k C'_a (R'_a + j\omega_k L_a) / (1 + j\omega_k C'_a R'_a)} \right| \quad (17)$$

因为屏蔽层对地电容回路阻抗远大于泄放阻尼回路阻抗,故忽略了对地电容回路。

采用第4节中的电缆型号,选择泄放电容为 $450 \mu\text{F}$ 时,根据式(17)得到不同频率谐波和电缆长度下泄放系数随阻尼电阻大小变化的曲线,如图7所示。

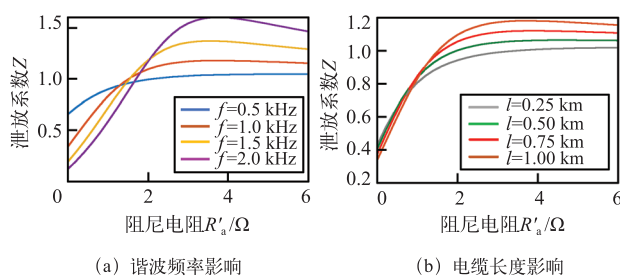


图7 谐波频率和电缆长度对阻尼电阻选择的影响

Fig. 7 Influence of harmonic frequency and cable length on damping resistance selection

由图7a可见,选择阻尼电阻值小于 2Ω ,可以对各次高频谐波感应电压起到抑制效果。图7b表明,在阻尼电阻值确定后,电缆长度对感应电压的抑制效果影响较小。结合图7a、b,对于示例中的电缆,为防止影响泄放电容降低高频谐波电流在屏蔽层不接地端感应电压的效

果,同时阻止屏蔽层谐振,建议阻尼电阻选择 $0.1 \sim 1 \Omega$ 。

4 仿真实验

采用YJV-26/35 kV交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆,其结构参数如下表所示。电缆体标称 $1 \times 300 \text{ mm}^2$,电压等级35 kV,线路长度 $1 \text{ km}^{[19]}$ 。

表 电缆结构参数

Tab. Structure parameters of cable

结构	铜导体	导体屏蔽层	XLPE绝缘层	绝缘屏蔽层	金属屏蔽层	外护套
外径/mm	9.77	10.27	20.77	21.47	22.97	25.67

4.1 屏蔽层耦合模型验证

利用图4所示的单端接地的屏蔽层等效模型和PSCAD自带电缆模型,分别就正三角和水平排列的三相单芯电缆开展仿真分析,得到屏蔽层感应电压如图8所示。其中, U_a 、 U_b 和 U_c 为利用本文建立的屏蔽层模型得到的三相屏蔽层感应电压; U'_a 、 U'_b 和 U'_c 为利用PSCAD中自带电缆模型得到的三相屏蔽层感应电压。图8验证了本文建立的屏蔽层模型的有效性。

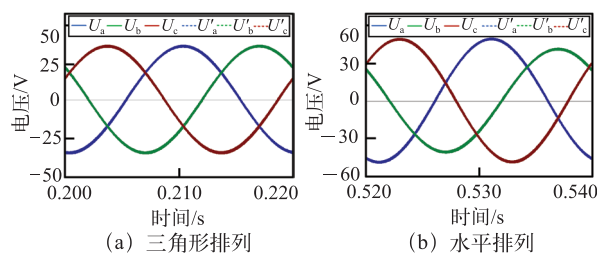


图8 屏蔽层模型有效性验证

Fig. 8 Validation of shielding layer model parameter

4.2 单端接地下泄放阻尼技术验证

在符合电能质量的要求下,钢厂谐波含量参考文献[20],三相电缆屏蔽层单端接地,选择泄放电容为 $450 \mu\text{F}$,接入泄放电容前后某相屏蔽层不接地端的感应电压如图9所示。由图9可知,当系统中含有谐波时,屏蔽层不接地端的电压比不含谐波时大很多;当屏蔽层不接地端通过泄放电容接地后,屏蔽层电压降低到不含谐

波时屏蔽层的感应电压附近,说明泄放电容有效降低了谐波在屏蔽层不接地端产生的电压。

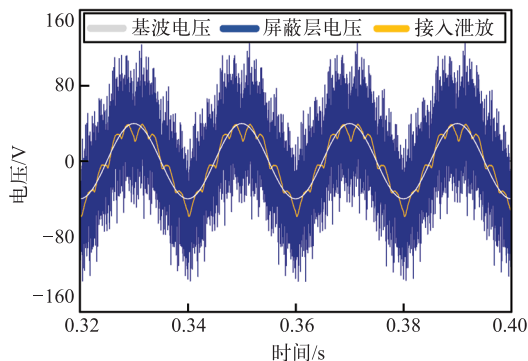


图9 接入泄放电容前后屏蔽层电压

Fig. 9 Voltage of shielding layer before and after connecting discharge capacitor

当系统中存在的谐波引起屏蔽层发生谐振时,接入泄放电容前后屏蔽层电压如图10所示。由图10可知,当谐波引起屏蔽层谐振时,屏蔽层不接地端电压远高于电缆正常运行时的感应电压;接入泄放电容后,改变了屏蔽层原谐振条件,谐振电压消失,且降低了谐波在屏蔽层不接地端产生的感应电压。

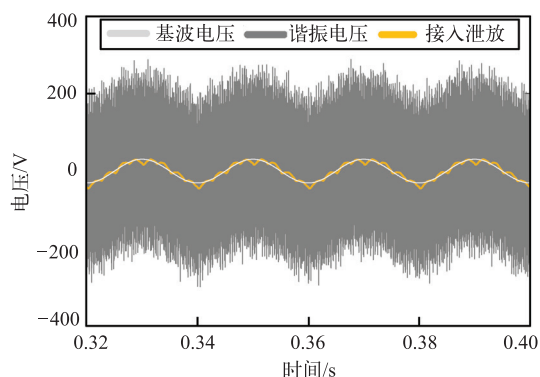


图10 谐振时接入泄放电容前后屏蔽层电压

Fig. 10 Voltage of shielding layer before and after connecting discharge capacitor during resonance

图11为泄放电容接入后引发屏蔽层阻抗和泄放电容间谐振的仿真结果。由图11可以看出,泄放电容的接入引发屏蔽层阻抗和泄放电容间谐振,导致屏蔽层不接地端电压激增。当泄放回路串入 $1\ \Omega$ 阻尼电阻后,谐振消失,屏蔽层谐振过电压得到明显抑制,且泄放电容降低谐波引起的感应电压效果没有受到太大影响。

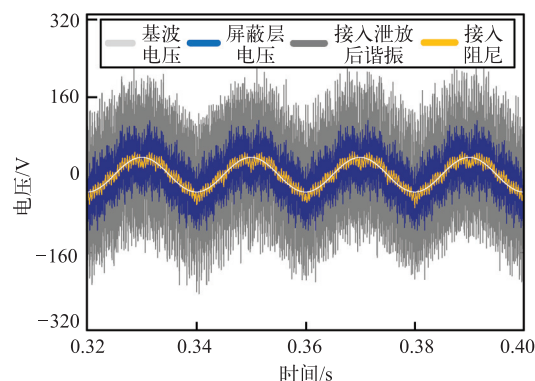


图11 接入阻尼电阻前后屏蔽层电压

Fig. 11 Voltage of shielding layer before and after connecting damping resistance

4.3 交叉互联接地泄放阻尼技术验证

三相电缆对称排列,屏蔽层交叉互联每小段长度均为600 m,线路中的谐波含量以及泄放电容和阻尼电阻取值同4.2小节。以其中一个交叉互联回路为例,屏蔽层经交叉互联换位后的两个互联端均通过泄放阻尼回路接地。交叉互联方式下,屏蔽层上的最高电压在两个互联端,接入泄放阻尼回路前后,屏蔽层两个交叉互联端处的感应电压如图12所示。由图12可知,本文提出的方案对采用交叉互联接地方式的屏蔽层谐波感应过电压同样有良好的抑制效果。

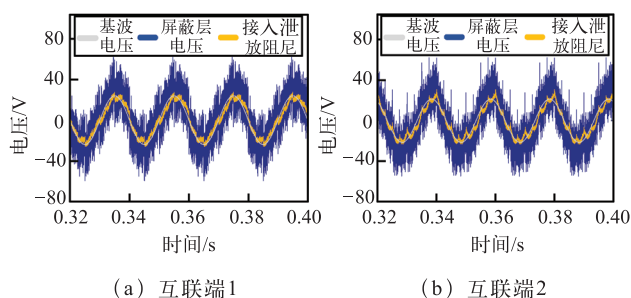


图12 接入泄放阻尼回路前后互联端电压

Fig. 12 Voltage of interconnection end before and after connecting discharge damping circuit

5 现场运行数据验证

基于上述抑制电缆屏蔽层过电压技术,研制泄放阻尼装置在山东莱芜钢厂冯家庄110 kV变电站带钢Ⅱ线运行,泄放阻尼装置如图13所

示。线路电压为35 kV，长约1.2 km，三相线路成正三角形方式排列，屏蔽层单端接地，选择泄放电容470 μ F，阻尼电阻1 Ω ，泄放阻尼装置三相参数相同。

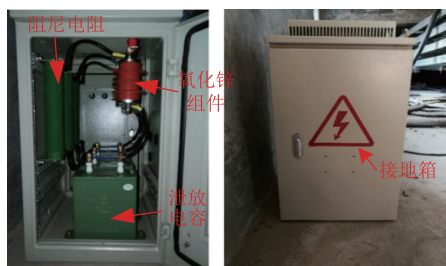


图 13 泄放阻尼装置

Fig. 13 Discharge damping device

在接入泄放阻尼装置前，莱钢Ⅱ线某相屏蔽层不接地端的感应电压和接地线电流由示波器测得波形，如图14所示。

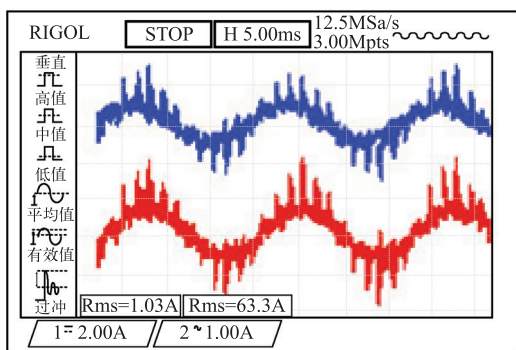


图 14 接入泄放阻尼装置前屏蔽层电压电流

(上: 电流, 下: 电压)

Fig. 14 Voltage and current of shielding layer before connecting discharge damping device (above: current, below: voltage)

将三相屏蔽层不接地端经泄放阻尼装置接地后，示波器测得波形如图15所示。

对比图14和图15可知，莱钢Ⅱ线中由于含有大量的谐波，正常运行下屏蔽层不接地端感应电压为63.3 V，不满足《电力工程设计规程》中50 V的上限要求；接入泄放阻尼装置后，有效降低了谐波在屏蔽层不接地端的感应电压，同时控制屏蔽层环流在允许的范围内，验证了泄放阻尼装置的有效性。实测中，图14不含有谐振过电压现象，接入泄放阻尼装置后，也没有引发谐振现象。

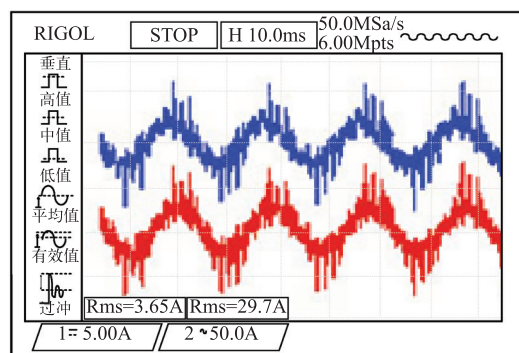


图 15 接入泄放阻尼装置后屏蔽层电压电流

(上: 电流, 下: 电压)

Fig. 15 Voltage and current of shielding layer after connecting discharge damping device (above: current, below: voltage)

6 结束语

针对谐波电流引起的单芯电缆屏蔽层感应电压过高和谐振过电压问题，提出并研究泄放阻尼技术解决方案，主要结论如下：

1) 电缆屏蔽层上的感应电压由静电感应和电磁感应产生，由此建立的电缆屏蔽层耦合模型可有效反映屏蔽层上的感应电压。

2) 所提出的泄放阻尼技术可有效降低谐波在屏蔽层上的感应电压，并抑制屏蔽层谐振，且接入的泄放阻尼装置不会引起新的谐振。

3) 屏蔽层经泄放阻尼装置接地不会引起屏蔽层电流过大，影响电缆导体载流量。

参考文献

- [1] IEEE guide for bonding shields and sheaths of single-conductor power cables rated 5 kV through 500 kV: IEEE Std 575-2014[S]. 2014.
- [2] 张营辉. 电力谐波引发电缆燃烧机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.
- [3] 张才军, 全风云, 陈佳, 等. 主变空载合闸引起的电缆护层过电压分析[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 170-176.
- [4] 欧景茹, 祁树文, 杨世春, 等. 高压单芯电缆线路金属护套接地方式[J]. 吉林电力, 2005(2): 19-21.
- [5] HEATON A, ISSA A. Transient response of

- cross-bonded cable systems[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1970, 117(3): 578-586.
- [6] 陈平, 薛强, 罗彦, 等. 单芯电力电缆护层过电压保护[J]. 高电压技术, 2004, 30(增刊): 6-7, 11.
- [7] 罗俊华, 周作春, 李华春, 等. 单芯电力电缆金属护层过电压保护器参数设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 355-358.
- [8] 戴剑. 一种单芯电缆屏蔽层保护器: CN202759227U[P]. 2013-02-27.
- [9] 黄嘉盛, 郑志豪, 航裕保, 等. 电缆护层保护器: CN205789356U[P]. 2016-12-07.
- [10] 倪欣荣, 马宏忠, 王东海, 等. 电缆护层电压补偿与护层电流抑制技术[J]. 电力系统自动化, 2007(5): 65-69.
- [11] 姜宁, 王东海, 王春宁, 等. 电力电缆护层电压补偿装置研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 52-55.
- [12] 王雅芳. XLPE电力电缆接地系统与感应环流分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [13] 徐政, 钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689-697.
- [14] 孙秋芹, 王冠, 李庆民, 等. 特高压双回线路耦合效应的计算与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 737-742.
- [15] 高俊国, 于萍澜, 李紫云, 等. 基于有限元法的电缆金属护套感应电压仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 714-720.
- [16] 王雄伟, 张哲, 尹项根, 等. 多回单芯电力电缆并联运行护套感应电压的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 77-84.
- [17] 查传忠. 运行中单芯高压电缆金属护套感应电压规定值提升的意义及讨论[J]. 电线电缆, 2010(2): 45-46.
- [18] 贾欣, 曹晓珑, 喻明. 单芯电缆计及护套环流时载流量的计算[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 25-26.
- [19] 胡其秀. 电力电缆线路手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [20] 薛耀华, 张丰收, 李峥. 钢厂中频炉系统谐波实测及治理[J]. 电气技术, 2010(6): 101-102.

作者简介



陈涛

陈涛(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

(收稿日期: 2019-09-26) **EA**