

带并联电抗器的超高压电缆-架空混合线路 三相永久性故障识别方法

张云柯, 李博通, 贾健飞, 荆方杰, 刘轶超

(天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对带并联电抗器的超高压电缆-架空混合线路, 分析了两相或三相不同性质故障时故障相的残余电压特性, 提出了基于差模电压频率测量的相间故障性质识别新判据。混合线路发生故障且两侧断路器跳开后, 利用扩展 Prony 算法快速获取差模电压频率。发生瞬时性故障时, 差模电压频率略低于工频; 发生永久性故障时, 差模电压频率接近于 0。基于上述特征可进行瞬时性故障与永久性故障的有效识别, 该方法原理简单, 且易于实现。大量的 EMTDC 仿真验证表明, 该方法能够有效可靠地实现超高压电缆-架空混合线路的永久性故障与瞬时性故障的识别, 且不受过渡电阻、故障位置及电力电缆所占线路全长比例的影响。

关键词: 混合线路; 并联电抗器; 永久性故障; 瞬时性故障; 差模电压; 故障分析

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.016

0 引言

超高压交流电缆-架空线混合输电形式因其在经济和环保等方面的综合优势, 在电网中的应用越来越广泛。混合线路重合闸的投入能够加快故障恢复, 提高系统的稳定性和供电可靠性, 具有显著的经济效益^[1-2]。现有的自动重合闸在重合前不能对故障性质进行判别, 一旦重合于永久性故障, 不仅不能恢复系统的正常供电, 而且导致的对电气设备的二次冲击远超过正常运行状态下发生短路时的损害^[3-5]。而自适应重合闸先判定故障性质, 若为永久性故障, 则闭锁重合闸; 若为瞬时性故障, 则启动重合闸。因此, 适用于电缆-架空混合线路的自适应重合闸能够克服现有盲目重合闸的不足, 进而提高系统的稳定性和供电可靠性。

相比于输电线路单相故障, 输电线路多相故障在线路故障中所占比例较小。但是, 重合闸重合于多相永久性故障对系统及电气设备的危害程度要远远超过重合于单相永久性故障^[6-8]。因此, 三相自适应重合闸应用于超高压电缆-架空混合线路有重要的研究价值。

由于三相跳闸后线路中可提取的信息甚少, 三相自适应重合闸的研究难度较大, 目前相关学者在三相自适应重合闸应用于超高压架空输电线路方面已取得了一定的研究成果。文献^[6]提出了基于线

路残余电压的方法, 该方法在相间过渡电阻较大时可能将瞬时性故障误判为永久性故障; 文献^[7]提出了基于电感电容参数的辨识方法, 但该方法的计算过程涉及微分和积分运算, 较为复杂, 同时作近似处理时会带来一定的误差; 文献^[8]提出了基于自由振荡分量频率幅值分离的方法, 该方法对采样率的要求较高, 且对不同性质故障的区分度不太明显。

对于超高压电缆-架空混合线路, 其参数特性与均一架空线路存在较大差异, 电缆区段的对地电容较大且相间电容为 0, 为避免电缆电容电流的影响、降低过电压及加速电弧熄灭, 一般装设带中性点小电抗的并联电抗器^[5-7]。目前针对超高压电缆-架空混合线路的自适应重合闸研究主要集中在利用故障测距结果确定是否重合上, 无法从根本上解决超高压电缆-架空混合线路瞬时性故障与永久性故障的识别问题^[9-12]。

本文针对带并联电抗器的超高压电缆-架空混合线路(下文简称混合线路), 详细分析了发生两相或三相不同性质故障时故障相的残余电压特性, 并利用扩展 Prony 算法快速获取差模电压的频率, 提出了基于差模电压频率测量的相间故障性质识别新判据。

1 相间故障三相跳闸后的残余电压分析

当两相或三相相间故障发生后, 混合线路两端断路器快速跳开。以单端带并联电抗器的混合线路为例, 对故障相残余电压进行分析。由于并联电抗器的补偿作用, 故障点电弧很快熄灭, 将混合线路各段采用 T 型等效, 熄弧后混合线路集中参数等效电路如图 1 所示。图中, R_l 为架空线区段电阻; L_l 为架空线区段电感; C_l 为架空线相对地电容; C_m 为架空

收稿日期: 2016-04-18; 修回日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207102); 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类项目(20120032120085)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207102) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China for New Teacher(20120032120085)

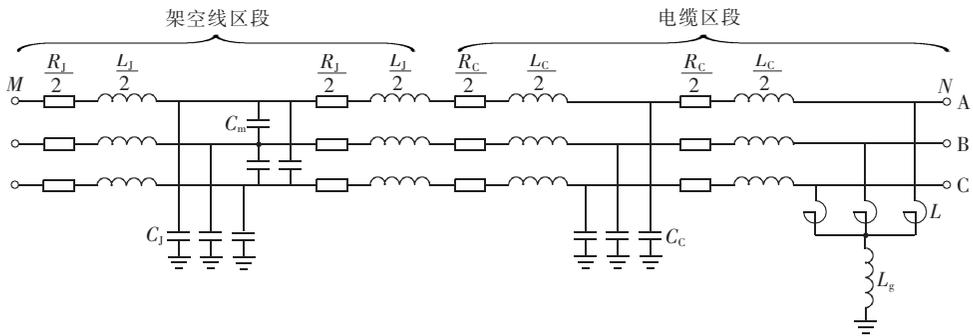


图 1 单端带并联电抗器混合线路集中参数等效电路图

Fig.1 Lumped-parameter equivalent circuit diagram of hybrid line with shunt reactors at one terminal

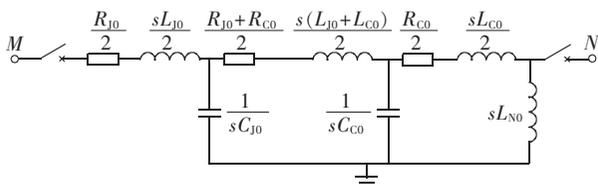
线相间电容; R_c 为电力电缆区段电阻; L_c 为电力电缆区段电感; C_c 为电力电缆相对地电容; L 、 L_g 分别为并联电抗器电感、中性点接地小电感。

实际工程中,三相电缆的金属屏蔽层和铠装层均接地,电缆区段的相间电容为 0,因此电缆区段与架空线区段的 T 型等效电路存在差异。

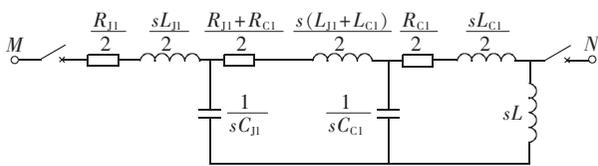
1.1 瞬时性故障的故障相残余电压分析

由文献[8]对相间瞬时性故障三相跳闸后暂态过程的分析可知,利用 Karrenbaur 变换对三相线路进行解耦,对应的零模分量和差模分量的复频域等效电路如图 2 所示,各模量的等效电感和电容储能未画出。图中, R_{j0} 、 L_{j0} 、 C_{j0} 和 R_{c0} 、 L_{c0} 、 C_{c0} 分别为架空线和电缆的零序电阻、电感、电容; R_{j1} 、 L_{j1} 、 C_{j1} 和 R_{c1} 、 L_{c1} 、 C_{c1} 分别为架空线和电缆的正序电阻、电感、电容; L_{N0} 由并联电抗器电感 L 和中性点小电抗器电感 L_g 变换而得,公式如式(1)所示。

$$L_{N0} = L + 3L_g \quad (1)$$



(a) 零模分量电路



(b) 差模分量电路

图 2 单端带并联电抗器混合线路复频域等效电路图

Fig.2 S-domain equivalent circuit diagrams of hybrid line with shunt reactors at one terminal

由于混合线路各区段的阻抗远小于其分布电容的容抗和并联电抗器感抗,忽略线路的阻抗,可近似认为每相的沿线电压处处相同。故障相对应的零模电压和差模电压的具体分析如下。

a. 零模电压。

根据零模分量电路,考虑零模等效电感和电容的

储能,运用节点电压法,可得复频域方程为:

$$\left(C_{j0}s + C_{c0}s + \frac{1}{L_{N0}s} \right) U_0(s) = U_{0\Sigma}(0_-)C_{0\Sigma} + \frac{I_{0\Sigma}(0_-)}{s} \quad (2)$$

其中, $U_0(s)$ 为复频域零模电压; $U_{0\Sigma}(0_-)C_{0\Sigma} + \frac{I_{0\Sigma}(0_-)}{s}$ 为零模分量等效电感和电容的储能。

对式(2)进行求解,并进行拉普拉斯反变换可得零模电压的频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{N0}(C_{j0} + C_{c0})}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{N0}C_{H0}}} \quad (3)$$

其中, C_{H0} 为混合线路的零序总电容。

综合考虑混合线路阻抗对储能的衰减作用,零模电压为:

$$u_0 = U_0 e^{-\alpha_0 t} \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (4)$$

其中, U_0 为零模电压幅值; α_0 为衰减因子; φ_0 为初相位。

b. 差模电压。

根据差模分量电路,考虑差模等效电感和电容的储能,运用节点电压法,可得复频域方程为:

$$\left(C_{j1}s + C_{c1}s + \frac{1}{Ls} \right) U_D(s) = U_{D\Sigma}(0_-)C_{D\Sigma} + \frac{I_{D\Sigma}(0_-)}{s} \quad (5)$$

其中, $U_D(s)$ 为复频域差模电压; $U_{D\Sigma}(0_-)C_{D\Sigma} + \frac{I_{D\Sigma}(0_-)}{s}$ 为差模分量等效电感和电容的储能。

对式(5)进行求解,并进行拉普拉斯反变换可得差模电压的频率 f_D 为:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L}{L(C_{j1} + C_{c1})}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_{H1}}} \quad (6)$$

其中, C_{H1} 为混合线路的正序总电容。

综合考虑混合线路阻抗对储能的衰减作用,差模电压为:

$$u_D = U_D e^{-\alpha_D t} \cos(2\pi f_D t + \varphi_D) \quad (7)$$

其中, U_D 为差模电压幅值; α_D 为衰减因子; φ_D 为初相位。

由上述分析可知,瞬时性相间故障时,故障相的残余电压由 2 种不同频率的衰减周期分量组成;零模电压频率主要由电感 L_{N0} 、架空线零序电容 C_{j0} 和电缆零序电容 C_{c0} 决定,与过渡电阻大小无关;差模电

压频率主要由并联电抗器的电感 L 和混合线路的正序总电容 C_{H1} 决定,与过渡电阻大小无关;当混合线路的零序总电容 C_{H0} 和正序总电容 C_{H1} 不变时,零模电压频率和差模电压频率随着并联电抗器电感值的增大而减小。

1.2 永久性故障的故障相残余电压分析

假设混合线路的架空线区段发生永久性两相或三相相间故障,故障点始终存在,可近似认为故障相的沿线电压处处相同。因此,对应的差模电压为 0,仅存在零模电压。

零模分量复频域等效电路如图 3 所示,等效电感和电容储能未画出。其中,故障点距离左侧 M 端的距离占架空线全长的比例为 x ; $\lambda = 1 - x$ 。

由图 3 可以看出:发生永久性故障时,忽略线路的阻抗,混合线路零模分量的拉普拉斯等效电路与瞬时性故障时相同。因此,考虑线路阻抗对储能的衰减,零模电压是频率为 f_0 的衰减周期分量。

由以上分析可知,发生瞬时性故障时故障相残余电压由频率为 f_0 的零模电压和频率为 f_0 的差模电压组成;发生永久性故障时故障相残余电压仅含有频率为 f_0 的零模电压。

2 不同故障性质下差模电压的仿真波形

单端带并联电抗器的混合线路 EMTDC 仿真模型如图 4 所示。图中, F 为故障发生位置, J 为架空线-电缆连接点;系统电压等级为 220 kV,线路总长度为 120 km,其中架空线区段、电力电缆区段的长度分别为 80 km、40 km。

架空线区段线路参数为: $Z_1 = 0.0347 + j0.4234 \Omega/\text{km}$, $Z_0 = 0.3000 + j1.1426 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.0087 \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0 = 0.0062 \mu\text{F}/\text{km}$ 。电力电缆区段线路参数为: $Z_1 = 0.0158 + j0.1511 \Omega/\text{km}$, $Z_0 = 0.1633 + j1.7456 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.1983 \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0 = 0.1983 \mu\text{F}/\text{km}$;并联电抗器电抗 $X_L = 565.4867 \Omega$;中性点接地小电抗 $X_g = 18.8496 \Omega$ 。

假设故障位置距离 M 端 40 km, 0.96 s 时发生三相相间金属性故障, 1.0 s 时两端断路器三相跳闸,发生瞬时性故障与永久性故障时差模电压仿真波形分别如图 5、6 所示。

由图 5 和图 6 可以看出:发生瞬时性故障时,差模电压为衰减较慢的周期分量,理论分析和仿真结

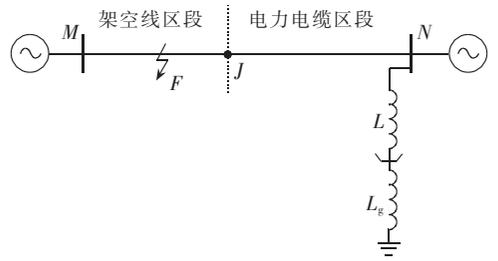


图 4 单端带并联电抗器混合线路混合线路仿真模型
Fig.4 Simulation model of hybrid line with shunt reactors at one terminal

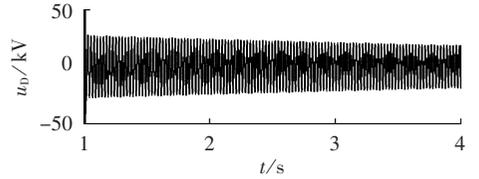


图 5 发生瞬时性故障时的差模电压仿真波形
Fig.5 Simulative waveform of differential mode voltage of transient fault

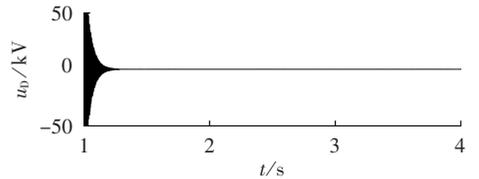


图 6 发生永久性故障时差模电压仿真波形
Fig.6 Simulative waveform of differential mode voltage of permanent fault

果相一致;发生永久性故障时,由于混合线路的电容较大,跳闸后的暂态过程中暂态高频分量十分丰富,且衰减较快;暂态高频分量完全衰减后,差模电压的幅值接近于 0,仿真波形与理论分析结论基本一致。

3 差模电压频率参数辨识方法

本文采用扩展 Prony 算法对差模电压频率参数进行辨识。扩展 Prony 算法采用的数学模型为一组 p 个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数^[13-14],其离散时间的函数形式为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^p b_m z_m^n \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

$$\begin{cases} b_m = A_m \exp(j\theta_m) \\ z_m = \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t] \\ p = q_1 + 2q_2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\hat{x}(n)$ 作为 $x(n)$ 的估计值, $x(n)$ 为真实信号的采

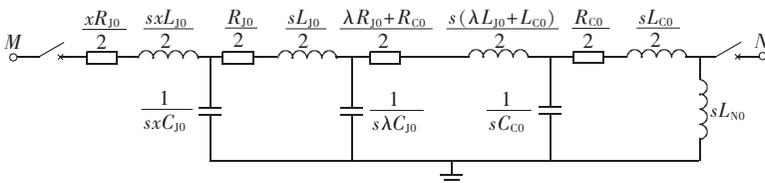


图 3 永久性故障时零模分量复频域等效电路图
Fig.3 S-domain equivalent circuit of zero-mode components of permanent fault

样值; b_m 和 z_m 为复数; A_m 为幅值; θ_m 为相位; α_m 为衰减因子; f_m 为频率; Δt 为采样间隔; q_1 为衰减直流分量的个数; q_2 为衰减余弦分量的个数。

由于式(7)所示的故障相差模电压可以看作是一个常系数线性差分方程的齐次解, 即有:

$$u_D(n) = -\sum_{m=1}^p c_m u_D(n-m) \quad p \leq n \leq N-1 \quad (10)$$

通过测量数据 $u_D(n)$, 式(10)的系数 c_m 可以通过下式求出:

$$\begin{bmatrix} u_D(p-1) & u_D(p-2) & \cdots & u_D(0) \\ u_D(p) & u_D(p-1) & \cdots & u_D(1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_D(N-2) & u_D(N-3) & \cdots & u_D(N-p-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_D(p) \\ u_D(p+1) \\ \vdots \\ u_D(N-1) \end{bmatrix} \quad (11)$$

求解特征多项式:

$$1 + c_1 z^{-1} + \cdots + c_p z^{-p} = 0 \quad (12)$$

可得到式(12)的根 z_m 。

进一步, 利用根 z_m 可求出故障相差模电压的频率 f 为:

$$f = \arctan \frac{|\operatorname{Im}(z_m) / \operatorname{Re}(z_m)|}{2\pi \Delta t} \quad (13)$$

在利用扩展 Prony 算法进行信号分析时, p 的选取十分重要。由上文分析可知, 混合线路发生瞬时性相间故障时, 故障相差模电压是一个衰减余弦分量。因此, 本文 p 取值为 2, 可满足计算精度的要求, 且仿真结果表明效果良好。

4 新判据的提出及仿真验证

混合线路两侧断路器跳开后的暂态过程中, 故障相的电压中含有十分丰富的暂态高频分量, 若直接利用扩展 Prony 算法对差模电压进行频率参数识别, 会影响频率参数辨识的准确性。因此, 本文首先利用高阶低通滤波器滤除差模电压中的暂态高频分量, 以提高计算精度。

混合线路发生瞬时性相间故障时, 差模电压频率为 f_0 ; 发生永久性相间故障时, 差模电压频率为 0。因此, 对于不同性质的相间故障, 其差模电压频率存在显著差别。

利用差模电压频率参数辨识方法, 对故障后的差模电压信号进行处理, 辨识得到其频率, 与整定值 f_{set} 进行比较。如果在重合闸设定时间内, 从某一时刻起一定时间段(5~10 ms)内辨识频率一直不大于整定值, 则认为发生了永久性故障, 重合闸闭锁; 如果从某一时刻起一定时间段内辨识频率连续大于整定

值, 则认为发生了瞬时性故障, 重合闸动作。永久性故障判据如下:

$$\begin{aligned} f &\leq f_{\text{set}} \\ f_{\text{set}} &= K f_0 \end{aligned} \quad (14)$$

其中, f_0 可由式(6)计算得到; K 为整定系数, 可取为 0.5~0.8。

目前运行的带并联电抗器线路通常为欠补偿方式运行, 并联电抗器的补偿度一般为 60%~90%, 在此补偿度下, f_0 在 38.7~47.4 Hz 范围内, 接近工频^[5-6]。当整定系数 K 恒定时, 由差模电压频率整定得到的 f_{set} 随着并联电抗器电感值的增大而减小至某一定值(最小值 19.35 Hz)。

对三相跳闸后的电压信号从 100 ms(5 个工频周期)开始进行录波, 然后采用 MATLAB 编程实现差模电压频率的辨识算法, 通过大量的仿真验证故障性质判据。仿真模型及线路参数见图 4, 瞬时性和永久性三相相间金属性故障都发生在距离 M 端 40 km 处, 采样频率为 2000 Hz, 算法数据窗选为 20 ms。计算可得本算例中 f_0 为 40.39 Hz, 取 f_{set} 为 30 Hz。混合线路发生不同性质的故障时差模电压频率辨识算法的分析结果如图 7 和图 8 所示。

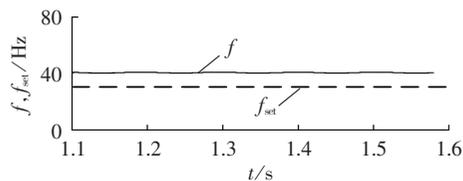


图 7 发生瞬时性故障时的差模电压频率辨识算法分析
Fig.7 Differential mode voltage analyzed by identification algorithm for transient fault

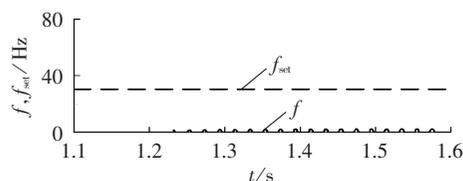


图 8 发生永久性故障时差模电压频率辨识算法分析
Fig.8 Differential mode voltage analyzed by identification algorithm for permanent fault

由图 7 和图 8 可以看出: 发生瞬时性故障时差模电压的辨识频率一直大于整定值 30 Hz; 而发生永久性故障时差模电压的辨识频率接近于 0, 且一直小于整定值。因此, 本判据能够实现故障性质的准确判定。

为进一步验证判据, 混合线路发生不同相间故障情况下的仿真结果如表 1 和表 2 所示。表中频率数据为 1.12 s 时刻的计算结果。

由表 1 和表 2 可以看出: 当发生永久性相间故障时, 差模电压频率 f_0 几乎为 0; 而当发生瞬时性相间故障时, 差模电压频率 f_0 在 40.45 Hz 附近, 始终大于

表 1 两相相间故障仿真结果

Table 1 Simulative results of two-phase faults

故障点位置/km	过渡电阻/ Ω	f/Hz	
		瞬时性故障	永久性故障
0	0	40.51	0
	20	40.52	0
20	0	40.45	0.01
	20	40.44	0
40	0	40.48	0
	20	40.46	0.01
60	0	40.59	0
	20	40.40	0.01
80	0	40.37	0
	20	40.36	0.01

表 2 三相相间故障仿真结果

Table 2 Simulative result of three-phase faults

故障点位置/km	过渡电阻/ Ω	f/Hz	
		瞬时性故障	永久性故障
0	0	40.51	0
	20	40.52	0
20	0	40.45	0.01
	20	40.44	0
40	0	40.48	0
	20	40.46	0.01
60	0	40.59	0
	20	40.40	0.01
80	0	40.37	0
	20	40.36	0.01

整定值 30 Hz。因此,本文判据能快速可靠地区分瞬时性故障和永久性故障,且不受故障位置和故障点过渡电阻的影响。此外,对于电缆区段占比不同的混合线路,笔者进行了大量仿真,仿真结果表明,本文判据均能快速可靠地识别故障性质,不受电力电缆所占线路全长比例的影响。

5 结论

本文针对单端带并联电抗器的混合线路,详细分析了发生不同性质的相间故障时故障相的残余电压特性,提出了基于差模电压频率测量的相间故障性质识别新判据。大量的 EMTDC 仿真结果表明,本文判据具有如下特点:判定时间短,且能够准确判断故障性质,有利于重合闸的快速动作;对信号采样率要求较低;不受过渡电阻、故障位置及电力电缆所占线路全长比例的影响。

参考文献:

- [1] 江南,谢聿琳,侯俊平,等. 电缆架空线混合线路重合闸投切方式[J]. 电力系统自动化,2010,34(3):112-115.
JIANG Nan,XIE Yulin,HOU Junping,et al. Reclosing mode of cable-overhead mixed lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(3):112-115.
- [2] 沈军,李超群,朱晓彤,等. 高压电缆-架空线混合线路重合闸新判据[J]. 电力系统自动化,2012,36(13):97-100.

- SHEN Jun,LI Chaoqun,ZHU Xiaotong,et al. New reclosing criterion for hybrid lines of high-voltage cables and pole lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(13):97-100.
- [3] 梁振锋,索南加乐,宋国兵,等. 输电线路自适应重合闸研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(6):140-147.
LIANG Zhenfeng,SUONAN Jiale,SONG Guobing,et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control,2013,41(6):140-147.
- [4] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996,380-386.
- [5] 郑涛,刘敏,郭飞. 并联电抗器中性点小电抗的选择及其对单相自适应重合闸的影响[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):62-67.
ZHENG Tao,LIU Min,GUO Fei. Influence of neutral reactor on single-phase adaptive reclose[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):62-67.
- [6] 李永丽,李博通. 带并联电抗器输电线路三相永久性和瞬时性故障的判别方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):82-90.
LI Yongli,LI Botong. Identification of three-phase permanent or temporary fault at transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(1):82-90.
- [7] 邵文权,宋国兵,索南加乐,等. 带并联电抗器输电线路三相自适应重合闸永久性故障判别[J]. 中国电机工程学报,2010,30(4):91-98.
SHAO Wenquan,SONG Guobing,SUONAN Jiale,et al. Identification of permanent faults for three-phase adaptive reclosure of the transmission lines with shunt reactors[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(4):91-98.
- [8] 梁振锋,索南加乐,康小宁,等. 利用自由振荡频率识别的三相重合闸永久性故障判别[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):124-130.
LIANG Zhenfeng,SUONAN Jiale,KANG Xiaoning,et al. Permanent faults identification using free oscillation frequency for three-phase reclosure on transmission lines with shunt reactors [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(7):124-130.
- [9] 束洪春,孙涛. 电缆-架空线混合线路故障行波测距新方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):1-7.
SHU Hongchun,SUN Tao. Fault locating based on transient traveling wave for hybrid transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):1-7.
- [10] 曾惠敏,林富洪. 高压电缆-架空线混合线路相位测距法[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):82-87.
ZENG Huimin,LIN Fuhong. Fault locating algorithm based on phase characteristics for hybrid high voltage transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):82-87.
- [11] 杨军,潘雪莉,江文波,等. 一种高压电缆-架空线混合线路智能重合闸方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):65-70.
YANG Jun,PAN Xueli,JIANG Wenbo,et al. Reclose scheme of HV overhead line with underground power cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):65-70.
- [12] 姜宪国,李博通,张云柯,等. 基于电压序量变化量的超高压混合线路故障测距方法[J]. 电网技术,2015,39(12):3578-3583.
JIANG Xianguo,LI Botong,ZHANG Yunke,et al. A fault location method for extra-high voltage mixed lines based on variation of sequence voltage[J]. Power System Technology,2015,39(12):3578-3583.

Parameter optimization of permanent magnetic actuator based on optimal operating energy

JIN Lijun¹, WANG Zeze¹, GUO Yu¹, LI Shuiqing², FANG Linchuan²

(1. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. CHIINT Electric Co., Ltd., Shanghai 201620, China)

Abstract: To satisfy the closing operation of vacuum circuit breaker and power performance requirements, the reaction characteristics of 12 kV vacuum circuit breaker body and transmission mechanism are converted to the moving core based on four-link transmission rule, and the mathematical model of the operating characteristic of permanent magnetic actuator is established. The core's displacement, the coil current and the capacitance voltage are obtained through the ANSYS-Maxwell simulation to calculate the average closing speed, the operating power and other parameters. Taking the optimal operating power of vacuum circuit breaker as objective function and the number of coil turns, the wire diameter and the operating current as the constraints, the orthogonal regression experiment is established based on simulations. The coil parameters are optimal designed by genetic algorithm. Experimental results show that the operating characteristics of permanent magnetic actuator meet the demand characteristics of vacuum circuit breaker, the operating power of permanent magnetic actuator is reduced from 970.41 J to 362.26 J with the optimal design, the impact velocity of the moving iron core is reduced, and the stability of the permanent magnetic actuator is improved.

Key words: permanent magnetic actuator; electric current breakers; optimal operating power; dynamic simulation; parameter optimization

(上接第 111 页 continued from page 111)

[13] 胡亚平,吕飞鹏,周鑫,等. 基于 PRONY 法的超高压线路单相自适应重合闸故障识别原理[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9):23-26.

HU Yaping, LÜ Feipeng, ZHOU Xin, et al. Identification of faults occurred on the extra high voltage transmission line based on PRONY method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9):23-26.

[14] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京:科学出版社, 2009: 186-190.

作者简介:



张云柯

张云柯(1988—),男,河南周口人,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail:yunke@tju.edu.cn);

李博通(1981—),男,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护与控制(E-mail:libotong@tju.edu.cn)。

Three-phase permanent fault identification for EHV cable-overhead hybrid line with shunt reactors

ZHANG Yunke, LI Botong, JIA Jianfei, JING Fangjie, LIU Yichao

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The residual voltage characteristics of different two-phase and three-phase faults are analyzed for EHV cable-overhead hybrid line with shunt reactors and a criterion based on the frequency measurements of differential mode voltage is proposed for identifying the interphase faults. After the breakers of both sides are tripped for a fault of hybrid line, the frequency of differential mode voltage is quickly obtained by the extended Prony algorithm, which is slightly below the power frequency for a transient fault while close to zero for a permanent fault. A method based on this property can be easily implemented to distinguish the instantaneous fault from the permanent fault. A lot of EMTDC simulations show that, immune to transition resistance, fault location and cable proportion, the proposed method effectively and reliably distinguishes the instantaneous fault from the permanent fault of EHV cable-overhead hybrid line.

Key words: hybrid line; shunt reactors; permanent fault; transient fault; differential mode voltage; failure analysis