# 基于串补线性化模型的含串补线路距离保护整定方法

黄宗超<sup>1</sup>,王 帆<sup>2</sup>,刘一民<sup>2</sup>,雷 淇<sup>1</sup>,李银红<sup>1</sup> (1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074; 2. 国家电网公司华北分部,北京 100000)

摘要:在含串联补偿装置(简称串补)线路的距离保护整定中,往往忽略金属氧化物非线性电阻(MOV)动作时 串补对外呈现的非线性阻抗特性,这使得距离保护整定存在不准确、灵敏度低的不足。采用串补线性化模型 描述串补MOV的影响,分析了含串补线路距离保护测量阻抗的分布特性,提出了一种基于串补线性化模型 的距离保护整定方法,实现了含串补线路距离保护的精细化整定。采用某实际电网算例,验证了所提方法的 有效性。仿真结果表明,该方法所得保护定值较传统整定方法具有更高的灵敏性。

DOI:10.16081/j.epae.201909025

#### 0 引言

串联补偿装置(简称串补)能够提高线路输送容量,保障输电系统的暂态稳定性,因而在超高压远距离输电工程中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。然而,串补具有集中容抗特性,破坏了输电线路阻抗分布的连续性; 且串补装置通常采用金属氧化物非线性电阻 MOV (Metal Oxide Varistor)作为本体过压保护支路,在 进行故障计算时将引入非线性阻抗元素。这两方面 因素都将给含串补线路的距离保护整定带来影响。

为探讨串补的容抗特性对继电保护整定的影 响,文献[2]详细分析了串补电容对各类继电保护动 作特性的影响,并提出了适用于含串补线路与相邻 线路保护间的整定原则。文献[3]以实际工程为例, 讨论分析了在线路串补安装位置不同的情况下保护 出现的拒动、误动情况,提出了相应的距离保护整定 方法。此外,也有大量文献在串补对距离保护原理 的影响方面进行研究。文献[4]分别分析了固定串 补对方向阻抗距离元件和故障分量距离元件的影 响。文献[5-6]详细分析了多串补线路在不同故障 类型、不同故障位置条件下电流电压反向的情况,提 出了一种含串补线路距离保护的配置方法。文献 [7-8]针对串补对差动保护动作特性的影响,提出了 相应的差动保护改进判据,并对保护特性进行灵敏 度分析。但不足的是,上述原理分析中均未对串补 本身阻抗特性进行详细分析,通常在MOV未导通状 况下将串补电容视为常数进行故障计算, MOV导通 工况下将串补进行旁路处理,没有考虑故障过程中 MOV动作对串补实际阻抗值的影响。

为了详细考虑计入 MOV 动作特性后的串补等效阻抗,文献[9]首次提出了串补线性化模型,即通过实验测试与数学推导,将考虑 MOV 影响下的串补装置等效为线性电阻与电容串联形式的模型,用于

精确描述实际故障状况下串补的等效阻抗。此模型 已应用于含串补线路的故障定位与保护算法中,文 献[10-12]中考虑了MOV动作特性对串补的影响, 无需知道串补具体工作状态即可准确地实现串补线 路故障位置识别与测距。文献[13]引入了串补线性 化模型,提出了一种基于电压与电流积分计算的单 相接地距离保护I段算法,提高了含串补线路距离 保护的可靠性与精确性。但在整定计算领域,将此 模型引入含串补线路距离保护整定的研究较少。

为了解决上述问题,本文引入了串补线性化模型描述计入MOV动作特性后的串补等效阻抗,通过分析含串补线路距离保护测量阻抗分布特性,综合串补安装位置、保护误动拒动等因素,提出了一种基于串补线性化模型的距离保护整定方法以实现含串补线路保护的精细化整定。该整定方法充分考虑特定故障状况下串补等效阻抗,与仅将串补电容视为常数的整定方法相比,有助于改善保护整定值,提高保护灵敏度。通过某实际电网整定算例验证了本文方法的有效性。

### 1 串补及其等效模型

常用的典型可控串补由串联电容器(C)、晶闸 管控制的电感支路(TCR)、旁路断路器(BPS)、MOV 和阻尼装置组成,如图1所示。正常工况下,TCR支



Fig.1 Schematic diagram of typical thyristor controlled series compensation device

路与串联电容器配合,通过调节并联等效阻抗大小 控制补偿容量。MOV支路与BPS支路都为保护支 路,当发生故障后电容器产生过电压时,MOV支路 导通分流限压;当故障电流进一步上升达到旁路容 量*I*<sub>BPS</sub>后,BPS闭合导通,使串联电容器和MOV保护 支路被旁路,避免设备损坏<sup>[14-15]</sup>。

目前串补主要采用2种数学模型。

(1)简单串补模型。

简单串补模型如图2所示,串补可以等效为电容器与理想开关并联的模型。当开关断开时,串补装置可以等效为一个电容器,阻抗为X<sub>c</sub>;当开关导通时,电容器被旁路,等效阻抗为0。为了简化计算,简单串补模型在工程中应用非常广泛。



图 2 简单串补模型

Fig.2 Simple model of series compensation

(2)串补线性化模型。

在串补典型结构中,MOV作为非线性电阻器考虑,其伏安特性可用单指数模型表示,如式(1)所示。

$$I_{\rm MOV} = I_{\rm max} \left( V/V_{\rm pt} \right)^{\alpha} \tag{1}$$

其中, $I_{MOV}$ 为通过 MOV 的电流; $I_{max}$ 为 MOV 两端间隙 闪络电流值;V为 MOV 两端电压; $V_{pt}$ 为 MOV 的保护 电压水平; $\alpha$ 为指数系数,一般取为 30~50。

当线路发生短路故障、短路电流大于 MOV 导通 水平且旁路支路未动作时,将出现串联电容器与 MOV 并联的情况,此时串补对外等效阻抗可等价为 两者并联值,如图 3(a)所示。经过大量测试与计算, 文献[9]首次提出,在 MOV 导通的情况下,串补可以 等效为线性电阻与电容相串联的串补线性化模 型<sup>[9]</sup>,如图 3(b)所示。



Fig.3 Series compensation equivalent model under condition of MOV conduction

流经串补装置的电流 $I_{u}$ 满足 $I_{u} = I_{1}/I_{u} > 0.98$  p.u.

时,其等效电阻 $R_{CM}$ 、等效容抗 $X_{CM}$ 分别为:  $R_{CM}=X_c(0.0745+0.49e^{-0.243I_{PM}}-35e^{-5I_{PM}}-0.6e^{-1.4I_{PM}})$ (2)

 $X_{CM} = X_c (0.101\ 0 - 0.005\ 749I_{pu} + 2.088e^{-0.856\ 6I_{pu}}) (3)$ 

其中, $I_1$ 为流过串补装置电流; $I_{\mu}$ 为保护电流水平; $X_c$ 为串补额定工况下的容抗值。故此时串补装置对外等效阻抗 $Z_{cm}$ 可表示为:

$$Z_{CM} = R_{CM} - jX_{CM} \tag{4}$$

图4为2种串补模型的电流--阻抗特性曲线,图 中,各变量均为标幺值。由图可见,简单串补模型阻 抗不随流过串补的电流大小变化而变化。然而,串 补线性化模型等效阻值 R<sub>cm</sub> 与等效容抗 X<sub>cm</sub> 随短路 电流 I<sub>pu</sub> 的变化呈非线性曲线关系,能具体描述在不 同短路电流水平下串补对外等效阻抗。



图4 串补线性化模型等效阻抗特性



当短路电流大于 MOV 导通水平且旁路支路未动作时,串补装置可采用串补线性化模型等效,等效阻抗为 Z<sub>CM</sub>;当短路电流超过旁路容量时,串补退出运行,等效阻抗为0。

#### 2 含串补线路距离保护测量阻抗分布特性

当故障位置随线路移动时,流过串补的短路电 流将发生变化,串补等效阻抗也会相应变化,故距离 保护测量阻抗将随故障位置呈一定的分布规律。

(1)串补安装在保护所在线路。

串补位于保护所在线路时,系统拓扑如图5所示, $Z_{P0}$ 、 $Z_{00}$ 均为线路正序阻抗,当故障点发生在距离保护KZ<sub>1</sub>所在线路与下一级线路时,测量阻抗 $Z_m$ 随故障位置变化表达式分别如式(5)和式(6)所示。

$$Z_{\rm m} = k Z_{PQ} - Z_{CM} \quad 0 < k < 1 \tag{5}$$

 $Z_m = Z_{PQ} - Z_{CM} + K_b k Z_{QN}$  0<k<1 (6) 其中,k 随短路点在线路上向远离保护方向移动取 0~1; $Z_{CM}$ 为给定故障位置时串补对应等效阻抗;  $K_b$ 为线路助增系数见式(7),无助增工况下 $K_b = 1$ 。

$$K_{\rm b} = \frac{I_{QN}}{I_{PQ}} = \frac{I_{PQ} + I_Q}{I_{PQ}} = 1 + \frac{I_Q}{I_{PQ}}$$
(7)

图 5 串补位于保护所在线路

Fig.5 Series compensation in line of protection

(2)串补安装在保护下一级线路。

串补位于保护下一级线路时,系统拓扑图如图 6所示。串补安装在距离保护KZ<sub>1</sub>下一级线路出口, 当故障发生在保护所在线路时,测量阻抗将不受串 补影响。但当故障发生在保护下一级线路时,测量 阻抗大小将由串补等效阻抗和支路助增电流共同决 定,测量阻抗 Z<sub>m</sub>随故障位置变化表达式分别如式 (8)和式(9)所示。

$$Z_{\rm m} = k Z_{P0} \qquad 0 < k < 1 \tag{8}$$

$$Z_{\rm m} = Z_{PQ} + K_{\rm b} (k Z_{QN} - Z_{CM}) \qquad 0 < k < 1 \tag{9}$$

134



Fig.6 Series compensation in next line of protection

在超高压电网系统中,通常可以忽略系统电阻, 以图5所示的串补安装在保护所在线路的纯电抗系统、无助增工况故障为例进行分析:串补线路PQ的补偿度为40%,当短路点接近串补出口处(串补所在线路5%以内)时,因短路电流达到BPS动作容量 I<sub>BPS</sub>,可看作串补已退出运行。当短路点位于串补出 口到下一级线路的52%之间时,串补MOV将动作, 此时可采用串补线性化模型。短路点以每相邻本线 路阻抗10%的间距逐点选取,获得特定故障下串补 等效阻抗,并作距离保护KZ,测量阻抗分布图。

短路点分布在保护所在线路和下一级线路时的 测量阻抗 $X_m$ 分布图分别如图7(a)、(b)所示。图中,  $\alpha_r$ 为故障位置所占当前线路长度的比例; $\alpha_z$ 为测量 阻抗占串补所在线路阻抗百分数。根据线路阻抗与 电容补偿阻抗大小作柱状图, $X_m$ 趋势线描述了线路 阻抗经串补阻抗补偿后测量阻抗的趋势,若测量阻 抗落到保护动作区内将会引起保护动作。





distance protection  $KZ_1$  with series compensation

从图7中可以看出,当故障点逐渐靠近保护时, 随着短路电流增大,串补等效阻抗逐渐减小。若发 生区外故障时因串补的补偿作用距离保护测量阻抗 落到保护动作区内将会引起保护误动,故需要在设 定线路保护整定值Z<sub>set</sub>时充分考虑串补的补偿范围。 同时发生区内故障时测量阻抗落到保护区外将会引 起保护拒动,如图7(a)中X<sub>m</sub>趋势线的虚线段所示, 若短路电流达到旁路串补的容量I<sub>BPS</sub>时串补可看作 退出运行,测量阻抗即为发生故障时所测线路阻抗, 保护不发生出口拒动;若串补未退出,其等效阻抗也 较小,仅需采取具有偏移圆动作特性的距离保护进 行整定即可避免保护出口拒动。

考虑串补线性化模型后,当故障电流大于保护 电流水平 $I_{\mu}$ 时,串补等效阻抗 $X_{CM}$ 将小于其额定容 抗 $X_c$ ,则它们的测量阻抗 $X_{mCM}$ 、 $X_{mC}$ 之差 $\Delta X_m$ 可统一 表示为式(10),如图8所示。故采用相同的整定方 法以躲开串补阻抗的影响,其保护整定值与考虑简 单串补模型的整定值相比较大,即保护灵敏度能得 到有效提升。同时,从图8虚线圈所示保护出口的 拒动区可以看出,串补所在线路距离保护使用串补 线性化模型进行整定的拒动区域与考虑简单串补模 型相比有大幅减小。



图 8 串补线性化模型与简单模型测量阻抗分布对比图 Fig.8 Measured impedance distribution comparison diagram of linearized series compensation model and simple model

当串补位于保护KZ,下一级线路出口(如图6所示)时,故障点位于下一级线路的测量阻抗分布需考虑分支线路的助增效果,串补等效阻抗与无助增工况时相比将会有所减小,总体分布趋势如图7(b)所示,故不再赘述。

因此基于串补线性化模型的含串补线路距离保 护整定方法可以得到改进,整定过程需要充分考虑 到串补等效阻抗的大小、串补所在线路保护与下一 级线路保护的配合,确保保护的选择性和灵敏性。

# 3 含串补距离保护整定方法

对于图5、6所示的系统,串补所在线路的保护 KZ<sub>1</sub>和下一级保护KZ<sub>2</sub>之间需要配合,整定过程要求 避开区外故障保护误动、区内故障保护拒动的情况。 因此,本文提出一种考虑串补线性化模型下的距离 保护速动段(Ⅰ段)和延时段(Ⅱ段、Ⅲ段)整定方法 如表1所示。表中,K<sub>in</sub>为灵敏系数;K<sup>Ⅱ</sup><sub>rel</sub>一般取为 0.8;K<sub>bmin</sub>为最小助增系数,定义为式(11)。

$$K_{\rm b.min} = \min\left(K_{\rm b}\right) \tag{11}$$

(1)串补安装在保护KZ1出口。

距离保护 KZ<sub>1</sub>速动段整定采用偏移圆阻抗特性 保证区内故障不拒动,满足:

$$90^{\circ} \leq \arg \left[ (Z_{\rm m} - Z_{\rm set1}^{\rm I}) / (Z_{\rm m} + Z_{\rm s}) \right] \leq 270^{\circ}$$
 (12)

14 1		还例权、	XE HJ H	又正化	<i>J</i> ] <i>I</i> Δ
Table 1	Instantane	ous and	time	delay	instance
	protection (	coordinat	ion m	ethods	

斯南保拉迪动船 延时船敷空方法

串补位置	保护	KZ <sub>1</sub> 整定阻抗
	速动段	$Z_{\text{set1}}^{\text{I}} = k_{\text{I}}^{1} \left( Z_{PQ} - Z_{CM-MAX} \right)  k_{\text{I}}^{1} \in [0.7, 0.8]$
KZ <sub>1</sub> 出口	延时段	$\begin{split} & Z_{\text{setl}}^{\text{II}} \geq & K_{\text{Im}} Z_{PQ}  K_{\text{Im}} > 1.25 \\ & Z_{\text{setl}}^{\text{II}} \leq & K_{\text{rel}}^{\text{II}} \left( Z_{PQ} - Z_{CM\text{-}M\text{-}I} + K_{\text{b,min}} Z_{\text{set2}}^{\text{II}} \right) \\ & Z_{\text{set1}}^{\text{II}} \leq & K_{\text{rel}}^{\text{II}} \left( Z_{PQ} - Z_{CM\text{-}M\text{-}II} + K_{\text{b,min}} Z_{\text{set2}}^{\text{II}} \right) \end{split}$
	速动段	$Z_{\text{set2}}^{\text{I}} = k_{1}^{2} Z_{QN}  k_{1}^{2} \in [0.7, 0.8]$
KZ <sub>2</sub> 出口	延时段	$\begin{split} & Z_{\text{set1}}^{\text{II}} \ge K_{\text{Im}} Z_{PQ}  K_{\text{Im}} \ge 1.25 \\ & Z_{\text{set1}}^{\text{II}} \le K_{\text{rel}}^{\text{II}} \left[ Z_{PQ} + K_{\text{b.min}} \left( Z_{\text{set2}}^{1} - Z_{CM-M-I} \right) \right] \\ & Z_{\text{set1}}^{\text{II}} \le K_{\text{rel}}^{\text{II}} \left[ Z_{PQ} + K_{\text{b.min}} \left( Z_{\text{set2}}^{\text{II}} - Z_{CM-M-II} \right) \right] \end{split}$
Į	$Z_{\rm S} \ge K_{\rm lm} \Big($	$Z_{CM.cri} - Z_{Lcri} \rangle \qquad  Z_{CM.cri}  \ge  Z_{Lcri}  $ (13)

$$\begin{cases} Z_{\rm S} \ge K_{\rm Im} \left( Z_{CM.cri} - Z_{\rm Lcri} \right) & |Z_{CM.cri}| \ge |Z_{\rm Lcri}| \\ Z_{\rm S} = 0 & |Z_{CM.cri}| \le |Z_{\rm Lcri}| \end{cases}$$
(13)

其中, $Z_{\text{Leri}}$ 和 $Z_{CM.eri}$ 分别为短路电流达到旁路串补容量 $I_{\text{BPS}}$ 时的线路正序阻抗和串补等效阻抗,当短路故障电流水平超过旁路串补容量时,串补装置退出运行,等效阻抗为0,反向动作区整定值 $Z_s$ 按躲过该工况边界进行整定。为躲开因下级线路故障造成的串补所在线路保护误动情况,距离保护 KZ<sub>1</sub>速动段整定方法如表1所示,保护整定值 $Z_{\text{set}}^{\text{I}} + Z_{CM-MAX}$ 为下级保护 KZ<sub>2</sub>出口处故障时的串补等效阻抗,此时所取阻抗为保护所在线路全线短路最大等效阻抗,从而保证整定值躲过最严苛工况以避免超越误动。保护整定阻抗分布如图9(a)所示。



coordination impedance

距离保护 KZ<sub>1</sub>延时段整定需要考虑与下一级保护 KZ<sub>2</sub>的速动段、延时段配合及支路助增电源的影响,如表1所示。

在与下一级线路保护配合中,为满足保护选择性的要求,Z<sub>CM-M-I</sub>分别取保护KZ<sub>2</sub>速动 I 段、延时 II 段保护区边界发生故障时的串补等效阻抗,保证整定值躲过最严苛运行工况以避免误动。综合约束条件范围内的保护整定值确保了全线灵敏度和上下级保护之间配合的选择性。保护整定阻抗分布如图 9(b)所示。

(2)串补安装在保护KZ<sub>2</sub>出口。

若串补位于保护 KZ<sub>2</sub>出口,则保护 KZ<sub>1</sub>速动段整 定无需考虑串补的影响。保护延时段整定阻抗中的 串补等效阻抗要考虑分支电源的助增作用,其阻抗 值Z<sub>CM-M-1</sub>Z<sub>CM-M</sub>需乘以最小助增系数 K<sub>b,min</sub>,见表1。

因上述距离保护速动段、延时段整定方法采用 下级线路保护出口或保护区域边界短路时基于串补 线性化模型的串补等效阻抗作为整定依据,相对采 用简单串补模型进行整定的情况,整定值灵敏度提 升,保护区范围明显增大。定义改进整定系数为:

 $C_{\rm IC} = (Z_{\rm set.CM} - Z_{\rm set.C}) / Z_1 \times 100\%$ (14)

其中,*C*<sub>IC</sub>为改进整定系数;*Z*<sub>set.CM</sub>和*Z*<sub>set.C</sub>分别为考虑 串补线性化模型和简单串补模型时的整定阻抗;*Z*<sub>I</sub> 为保护所在线路正序阻抗。整定系数*C*<sub>IC</sub>的大小反 映了采用串补线性化模型进行整定时,相比于采用 简单串补模型进行整定时灵敏度提升的程度。

综合上述基于串补线性化模型的含串补线路距 离保护整定方法可得出以下结论。

(1)距离速动段采用偏移圆阻抗特性整定以避免保护拒动,距离延时段通过躲开特定故障情况下 串补等效阻抗整定以避免保护误动。保护整定值保 证了全线灵敏度和上下级保护之间配合的选择性。 此外,由于采用了具有偏移圆阻抗特性的距离保护, 实际保护具有一定的耐受过渡电阻能力。

(2)随着串补安装位置的不同,串补等效阻抗对 延时段保护整定阻抗的影响也不同。当串补位于保 护所在线路时,流过串补电流为当前线路保护测量 电流,等效阻抗助增系数为1;当串补位于保护下一 级线路时,串补等效阻抗需计及助增电流的影响,且 助增系数取最小助增系数。

(3)与采用简单串补模型进行整定相比,所提整 定方法具有更高的灵敏性。引入改进整定系数 C<sub>ic</sub> 描述灵敏度提升的程度, C<sub>ic</sub>越大表示与采用简单串 补模型整定相比保护区增大越突出,灵敏度提升越 明显。

## 4 算例验证

以某 500 kV 含串补实际电网为例进行整定计算,系统拓扑结构如图 10 所示。整定计算中特定工况下的串补等效阻抗采用基于牛顿迭代法的故障计算方法应用 MATLAB 编程实现。串补装置安装在双回线路的一侧,补偿度各为 35 %。忽略系统电阻,系统参数如下:基准容量为100 MV·A,串补电抗为





14.995 Ω, MOV 过电压倍数为 2.3, 线路正序电抗为 0.274 9 Ω/km, 零序电抗为 0.738 9 Ω/km, 母线 4 侧 等值系统正序电抗为 23.662 Ω, 零序电抗为 27.146 Ω。

以含串补线路L<sub>2</sub>为例,沿线路设置单相短路故障,改变故障位置 $\alpha_r$ 与故障过渡阻抗 $Z_r$ ,计算相应保护1的测量阻抗,其变化曲线如附录中的图A1所示。该线路保护测量阻抗随着故障逐渐远离、过渡阻抗的增大而增大,当测量阻抗小于保护整定值时进入保护动作区时,距离保护动作。

图 10 中系统各相邻距离保护之间的配合关系 见表 2,按第 3 节所提的基于串补线性化模型的距离 保护整定计算方法计算系统中所有保护的整定值。

	表2 相邻线路保护间的配合关系					
Table 2	Coope	erative	relationship	p between	protections	

	5		
本保护	上级保护	本保护	上级保护
1	9	6	1,2
2	9	7	—
3	7,8	8	—
4	7,8	9	—
5	1,2	10	3,4

以特定单相短路、三相短路故障工况下求得的 串补等效阻抗*X<sub>cm</sub>*作为整定基础,分别对图10所示 系统中接地距离保护和相间距离保护进行整定。将 采用串补线性化模型的整定值与仅考虑简单串补模 型的整定值(速动段、延时段)进行对比,并计算改进 整定系数*C<sub>ic</sub>*以评价所提整定方法对保护灵敏度改 进的情况,整定值分别如附录中的表A1、A2所示。

算例整定结果显示,若保护速动段及延时段整 定过程均无需考虑串补影响(如保护5、6、10),则显 然灵敏度无提升效果;但若保护速动段或延时段整 定过程受串补影响(如保护1-4、7-9),则采用串 补线性化模型对保护的灵敏度提升效果明显。

图 11 为采用所提整定方法后的各保护改进整 定系数 C<sub>ic</sub>。综合计算结果与改进整定系数分布图 可得到以下结论:

(1)与采用传统的简单串补模型进行整定相比, 采用串补线性化模型后,部分距离保护速动段与延时段保护区范围有效增大,保护灵敏度得到提升,达到了提高保护定值性能的目的;

(2)由前述保护速动段与延时段整定计算公式 结合实际算例结果可知,若发生故障时串补等效阻 抗偏离串补额定阻抗越远,保护灵敏度提升的趋势 越明显;因实际网络中助增支路的影响,延时段保护 整定值灵敏度提升程度大于速动段;

(3)因与接地距离保护相比,流过相间距离保护 元件的短路电流较大,故其保护整定中的串补等效 阻抗将会较小,相间接地距离保护整定值灵敏度提 升更为明显。



综合以上对某实际电网的速动段、延时段距离 保护整定计算结果的分析可知,本文所提基于串补 线性化模型的距离保护整定方法,有利于对含串补 线路的距离保护进行精细化整定,增大保护速动段、 延时段保护区范围,提高距离保护灵敏度,对考虑含 串补线路的精细化距离保护整定计算有实际意义。

# 5 结论

本文针对含串补线路的距离保护整定问题,引 入串补线性化模型具体描述计入MOV动作特性后 的串补等效阻抗,通过分析含串补线路距离保护测 量阻抗的分布,提出了一种含串补线路的距离保护 整定方法。理论分析与实例仿真验证结果表明,该 方法与传统考虑简单串补模型的整定方法相比具有 更高的保护灵敏度,有助于改善距离保护整定值。 此外,本文仅讨论了以全电压电流为测量量的距离 保护整定情况,因此本文所提串补线性化模型能增 大含串补线路等效阻抗,有效提升保护灵敏性,故可 进一步将此模型推广到其他类型线路距离保护整定 中,如故障分量距离保护等,为实际工程中含串补线 路的距离保护精细化整定提供有效的解决方法。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1]张文亮.先进电力电子技术在智能电网中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(4):1-7.
   ZHANG Wenliang. Application of advanced power electronics in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(4): 1-7.
- [2]张勇. 含串补电容的线路继电保护运行与整定[J]. 南方电网 技术,2008,2(1):75-79.
   ZHANG Yong. Operation and setting of relaying protection for lines with serial capacitors[J]. Southern Power System Technology,2008,2(1):75-79.
- [3] 李钢,钱锋平.大房双回 500 kV线路加串补对距离保护的影响[J]. 华北电力技术,2002(2):6-7.
   LI Gang,QIAN Fengping. Influence of Datong-Fangshan 500 kV lines adding series compensation capacitor to distance protection system[J]. North China Electric Power,2002(2):6-7.
- [4] 王为国. 固定串补电容对输电线路继电保护影响的综述[J]. 电网技术,1998,22(11):20-21.
   WANG Weiguo. Influence of fixed series capacitor on protective relayings for transmission line[J]. Power System Technology, 1998,22(11):20-21.

[5]高超.特高压多串补系统电流特性分析[J].电工技术学报, 2015,30(20):193-198.

GAO Chao. Analysis on current characteristics of ultra high transmission line with multi series compensation capacitors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (20):193-198.

- [6] 王兴国,杜丁香,周春霞,等. 多串补线路保护动作性能分析
  [J]. 电网技术,2012,36(5):190-197.
  WANG Xingguo, DU Dingxiang, ZHOU Chunxia, et al. Analysis on protection performance of transmission line with multi series compensation capacitors[J]. Power System Technology, 2012,36(5):190-197.
- [7] 李振兴. 大串补线路电流差动保护拒动因素及改进保护方法 [J]. 电力自动化设备,2018,38(1):199-204.

LI Zhenxing. Analysis of current differential protection maloperation in power transmission line with high series compensation and corresponding improved protection method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):199-204.

- [8]朱晓彤. 串联补偿线路电流反向对差动保护的影响及对策
   [J]. 电力系统自动化,2015,39(14):151-156.
   ZHU Xiaotong. Influence and countermeasures for current reversal on differential protection of series compensated lines
   [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 151-156.
- [9] GOLDSWORTHY D L. A linearized model for MOV-protected series capacitors [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987,2(4):953-957.
- [10] 张金虎. 基于双端量的串联补偿线路单相接地故障测距算法
   [J]. 电力自动化设备,2015,35(4):121-125.
   ZHANG Jinhu. Single-phase grounding fault location algorithm based on dual terminal variables [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):121-125.
- [11] 张金虎、基于改进 RL模型的串联补偿线路单相接地故障测距 新算法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(10):1-7.
   ZHANG Jinhu. A novel single-phase ground fault location algorithm for series compensated line based on improved RL model[J]. Power System Protection and Control,2015,43(10): 1-7.

- [12] 陈福锋.适用于串联电容补偿线路的距离保护新原理[J].电力系统自动化,2010,34(12):61-66.
   CHEN Fufeng. Research on new principle of distance protection adapted to series capacitor compensated line[J]. Auto-
- mation of Electric Power Systems,2010,34(12):61-66.
  [13] 徐振宇. 一种平行双回串联补偿线路单相接地故障距离一段保护算法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):3019-3021.
  XU Zhenyu. First-zone distance protection algorithm of series compensated parallel transmission lines for single-phase to ground faults [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3019-3021.
- [14] JAMHORIA S, SRIVASTAVA L. Applications of thyristor controlled series compensator in power system: an overview [C]// 2014 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation. Thrissur, India: IEEE, 2014:1-6.
- [15] 胡玉峰,尹项根,陈德树,等. 可控串补(TCSC)本体保护原理、 配置及实现研究[J]. 继电器,2003,31(7):28-33.
  HU Yufeng,YIN Xianggen,CHEN Deshu, et al. The study in protection theory, disposition and realization of TCSC device
  [J]. Relay,2003,31(7):28-33.

#### 作者简介:



黄宗超

黄宗超(1996—),男,浙江宁波人,硕士 研究生,主要研究方向为电力系统保护控制与 调度(E-mail:zongchaohuang@hust.edu.cn);

王 帆(1987—),男,北京人,工程师, 硕士,主要研究方向为电网调度继电保护整 定计算;

刘一民(1981—),男,山西吕梁人,高级 工程师,博士,主要研究方向为继电保护整 定计算及其运行;

雷 淇(1995—),女,湖北武穴人,硕士研究生,主要研 究方向为电力系统继电保护整定和校核计算(E-mail: qilei@hust.edu.cn);

李银红(1976—), 女, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 主要研 究方向为电力系统分析、整定计算(E-mail: liyinhong@hust. edu.cn)。

# Distance protection setting method of series-compensated line based on series compensation linearized model

HUANG Zongchao<sup>1</sup>, WANG Fan<sup>2</sup>, LIU Yimin<sup>2</sup>, LEI Qi<sup>1</sup>, LI Yinhong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

- Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
- 2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100000, China)

Abstract: In the distance protection setting of series-compensated lines, the nonlinear impedance characteristics of the series compensation devices when the MOV(Metal Oxide Varistor) acts are often neglected, which causes inaccuracy and low sensitivity of distance protection setting. The series-compensated linearization model is used to describe the influence of series-compensated MOV. The distribution characteristics of the measured impedance of the distance protection of series-compensated lines are analyzed. A distance protection setting method based on the series-compensated linearization model is proposed, which realizes the refined setting of the distance protection of series-compensated lines. The effectiveness of the proposed method is verified by an actual power grid example. The simulative results show that the setting values obtained by the proposed method are more sensitive than those obtained by traditional setting methods.

Key words: series compensation device; linearized model; distance protection setting; relay protection; sensitivity



图 A1 保护 1 测量阻抗分布图

Fig.A1 Measured impedance distribution of Protection 1

表 A1 接地距离保护整定值
TableA1 Setting values of grounding distance protection

	整定值/Ω			整定	— 	
保护 ——	速率	速动段		延时段		
	线性化 模型	简单 模型		线性化 模型	简单 模型	
1	21.664	20.544	5.452	65.293	65.293	—
2	20.879	19.758	5.674	63.319	63.319	—
3	20.544	20.544	—	49.816	49.816	—
4	19.758	19.758	_	48.539	48.539	_
5	13.933	13.933	—	无	无	—
6	10.117	10.117	—	无	无	—
7	13.933	13.933	—	64.321	64.321	—
8	10.117	10.117	—	38.008	38.008	—
9	14.648	14.648	—	108.007	88.625	21.869
10	14.648	14.648	—	无	无	—
注:""表示	示无改进效果。					

# 表 A2 相间距离保护整定值

TableA2	Setting	values o	of phase-	to-phase	distance	protection
I GOICI I	Second	· unueb (	or pricese	to phase	anstance	Protection

保护 —	整定值/Ω			整定	改进 C /%	
	速云	速动段		延用		
	线性化	定值		线性化	定值	
	模型	模型		模型	模型	
1	23.938	20.544	16.521	57.015	57.015	—
2	23.359	19.758	18.226	54.835	54.835	—
3	23.111	20.544	12.495	41.825	41.825	—
4	22.739	19.758	15.088	40.226	40.226	—
5	13.933	13.933	—	无	无	—
6	10.117	10.117	—	无	无	—
7	13.933	13.933	—	69.208	58.399	18.509
8	10.117	10.117	—	39.207	33.556	16.841
9	14.648	14.648	—	134.75	95.611	40.936
10	14.648	14.648	_	无	无	_

注:"--"表示无改进效果。

附录