

大串补线路电流差动保护拒动因素及改进保护方法

李振兴¹,王 玲¹,黄悦华¹,孟晓星²,李振华²

(1. 三峡大学 电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002;2. 三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心,湖北 宜昌 443002)

摘要: 大串联补偿设备在超高压输电系统中得到越来越广泛的应用,伴随着复杂多系统的互联,含大串联补偿设备的线路(简称串补线路)在特定运行方式下出现线路背侧系统阻抗较小,可能导致线路内部故障时系统电流反向,此时串补线路电流差动保护可能会因灵敏度不足而拒动。基于此,详细分析了串补线路电流反向的原因及其对差动保护的影响。重点对不同串补度、系统功角差和过渡电阻等影响因素下的差动保护的動作特性进行研究。进一步地,为解决差动保护拒动问题,提出一种基于串补线路两侧电流幅相综合制动的电流差动保护改进判据,该判据能够有效解决串补线路内部故障时灵敏度降低的问题。仿真结果显示,相比传统差动保护,改进方案能够明显提高保护灵敏度。

关键词: 串补设备;超高压输电线路;电流反向;电流差动保护;灵敏度分析

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.030

0 引言

串联补偿(下文简称串补)设备可以降低线路感抗,进而能很好地提高高压输电线路电能传输能力及系统稳定性,所以在远距离高压输电线路中得到了广泛的应用。但串补设备的应用也改变了输电线路参数的均匀性,给输电线路继电保护带来了严重挑战^[1]。

目前,串补设备对线路保护影响的研究主要集中在距离保护和方向保护,大量的解决方案和对策被提出,并在工程应用中发挥了重要作用^[2-4]。但串补设备对差动保护的影响往往被忽略。事实上,由于大系统的互联,串补线路在特定运行方式下会出现线路背侧系统阻抗较小的现象,这可能导致发生线路内部故障时系统电流反向,此时串补线路电流差动保护可能会因灵敏度不足而拒动^[5-7]。为了提高电流差动保护灵敏度,当前研究大致分为基于参数模型的保护新算法^[8-11]和改进制动原理的新算法^[12-14] 2类,这些研究重点解决分布电容和过渡电阻对电流差动保护的影响,并未考虑电流反向的影响。目前,也有部分学者开展了电流反向对差动保护影响的研究。文献^[5]从理论上分析了不同故障位置 and 不同故障类型下串补线路电流反向的条件,但未对电流反向对电流差动保护的影响提出解决措施。文献^[6]分析了多串补线路故障后的电气特征,提出压敏电阻(MOV)不导通或部分导通是电流反向的前提,利

用记忆电压电流识别电流反向时进一步采取闭锁电流差动保护的措施。而闭锁保护的措施并不能解决保护拒动问题。文献^[7]分析了串补线路电流反向对零序差动保护影响的机理,针对线路高阻接地故障时零序差动保护灵敏度不足提出了改进算法。由上述研究成果可知,串补线路的电流反向问题存在多方面因素,其对电流差动保护的影响也需要考虑过渡电阻、串补度、系统功角差等综合条件进行分析。更进一步地,需要针对电流反向导致电流差动保护拒动的情况研究改进保护判据。

基于上述问题,本文为提高串补线路发生内部故障时电流差动保护的灵敏性,解决电流反向导致的电流差动保护拒动的问题,重点考虑不同串补度、系统功角差和过渡电阻等影响因素开展串补线路电流差动保护的動作特性研究,进一步提出改进判据解决电流差动保护拒动问题。

1 电流反向原因分析

输电线路的串联设备包括可控串补 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)、固定串补 FSC (Fixed Series Compensation) 2种,这 2 种设备均具有串联电容和本体保护系统(MOV+ 放电间隙),在系统发生严重故障、通过电容器的短路电流较大时,本体保护系统将快速动作(可在 1 ms 以内^[15] 动作)旁路电容器,此时串补线路不会出现电流反向问题。但是,当系统发生高阻接地故障时,系统故障电流较小,本体保护系统可能不会导通,考虑到大系统互联的情况,串补线路可能会出现电流反向问题。如果在电流反向时发生串补线路内部短路故障,特别是在线路补偿电容出口处故障时,继电保护工况将处于较为严重的状态^[16]。此时若电流差动保护拒

收稿日期:2016-12-09;修回日期:2017-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477090);强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金资助项目(2016KF003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477090) and State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (HUST) Open Foundation Project(2016KF003)

动,将给系统稳定运行带来不利影响。因此,有必要结合系统特征,从理论上详细分析电流反向的机理。

本文以一简单两端系统为例进行分析,其串补线路发生内部故障时的单回系统等值模型如图 1 所示。

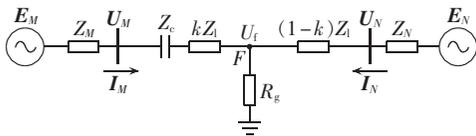


图 1 串补线路内部故障示意图

Fig.1 Schematic diagram of internal fault of power transmission line with series compensation

a. 当点 F 发生三相对称性短路时, M 端电流为:

$$I_M = \frac{E_M}{Z_M + kZ_1 - Z_c} \quad (1)$$

其中, E_M 为 M 端系统等值电势; Z_M 、 Z_1 、 Z_c 分别为系统等值阻抗、线路阻抗、串补设备阻抗; k 为点 F 到 M 端母线的距离占故障线路长度的比例。在大系统互联情况下, Z_M 较小; 此时, 若点 F 距离 M 端母线较近, k 值较小, 则式(1)中分母易满足 $Z_M + kZ_1 \ll Z_c$, 此时点 F 左端系统阻抗呈容性, 故障电流 I_M 的相位超前 E_M , 发生电流反向。计算故障时刻加载在串补设备两端的电压:

$$|U_c| = \left| \frac{E_M}{Z_M + kZ_1 - Z_c} Z_c \right| = \left| E_M / \left(1 - \frac{Z_M + kZ_1}{Z_c} \right) \right| > |E_M| \quad (2)$$

在实际工程中, 当 $|U_c|$ 大于保护装置的出口定值(该定值为 68.5 kV, 小于 $|E_M|$) 时, 串补设备的本体保护系统会瞬时触发放电间隙导通导致电容器被旁路, 电流反向现象只会在较短时间(1 ms)内出现然后恢复^[15]。

b. 假设系统中正序阻抗与负序阻抗相等, 当点 F 发生非对称性故障时, 以单相接地故障为例, 故障后的复合序网络图如图 2 所示。图中, 下标 0、1、2 分别表示零序、正序、负序; R_g 为过渡电阻。

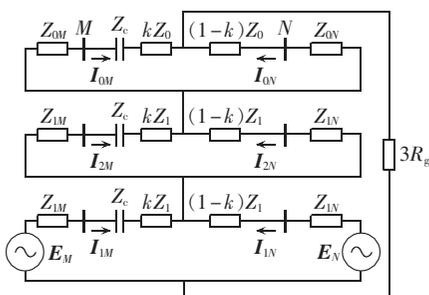


图 2 单相接地故障复序网络图

Fig.2 Composite sequence network of single-phase grounding fault

由图 2 可知, 对正序网络的分析方法类似对称性故障分析, M 、 N 端的正序故障电流分别如式(3)、(4)所示。

$$I_{1M} = \frac{E_M - U_{f(1)}}{Z_{1M} - Z_c + kZ_1} \quad (3)$$

$$I_{1N} = \frac{E_N - U_{f(1)}}{Z_{1N} + (1-k)Z_1} \quad (4)$$

$$U_{f(1)} = (I_{1M} + I_{1N})R_g \quad (5)$$

由式(3)可知, 当 $Z_{1M} + kZ_1 < Z_c$ 时, 故障电流 I_{1M} 超前 $E_M - U_{f(1)}$, 此时电流是否为容性取决于对侧故障电流 I_{1N} , 假设两端系统等值电势幅值相等, 取 $E_N = E_M e^{j\delta}$ (δ 为系统两端功角差), 则 M 端的正序电流为:

$$I_{1M} = \frac{E_M(1 + m - m e^{j\delta})}{(Z_{1M} + kZ_1 - Z_c) + R_g \left[1 + \frac{Z_{1M} + kZ_1 - Z_c}{Z_{1N} + (1-k)Z_1} \right]} \quad (6)$$

$$m = R_g / [Z_{1N} + (1-k)Z_1]$$

由前文分析可知, 在特定场景下存在 $Z_M + kZ_1 \ll Z_c$, 此时式(6)所示的电流可能发生反向。进一步地, 系统两端的功角差和过渡电阻也会影响正序电流的相位和幅值大小。

零序网络下, 当 $Z_M + kZ_1 \ll Z_c$ 时也会发生电流反向, 具体分析可参见文献[7]。负序网络下的分析方法和零序网络类似, 在此不再赘述。

M 端故障电流为:

$$I_M = I_{1M} + I_{2M} + I_{0M} \quad (7)$$

综合上述分析可知, $Z_M + kZ_1 \ll Z_c$ 的情况下, 线路发生非对称性故障时串补度过大是导致电流反向的主要因素, 且过渡电阻和系统两端功角差也会影响故障电流的幅值大小和相位。

若系统发生故障时过渡电阻 R_g 过大, 则式(7)所示的故障电流并不是很大, 电容器本体保护系统本身不会旁路, 串补设备符合上述分析模型, 等效为一个电容。此时若串补度较大的线路发生故障会导致电流反向, 进而给线路电流差动保护带来拒动的风险。

2 电流差动保护的影响因素及其分析

2.1 导致电流差动保护拒动的因素

根据第 1 节的分析, 串补线路发生区内故障时存在电流反向的可能, 同时故障电流的幅值和相位受串补度、两端系统的等值阻抗及功角、故障形式(故障类型和故障位置)以及过渡电阻的大小等多种因素影响。电流差动保护作为串补线路的主保护, 其差动电流为两侧电流相量和的模值, 在一侧电流出现反向时, 保护很可能因灵敏度不足而出现拒动。

为了分析电流差动保护在电流反向时可能出现的拒动特性, 本文从灵敏度角度出发, 根据其变化判断差动保护动作与否。为方便理论分析, 选取电流差动保护一般判据如式(8)所示。

$$I_d > I_{set}, \quad I_d > K_1 I_t \quad (8)$$

其中, $I_d = |I_M + I_N|$ 为线路差动电流; $I_t = |I_M - I_N|$ 为制动电流; I_{set} 为差动保护最小动作门槛值; K_1 为比率制

动系数。

差动保护灵敏度系数 $K_{\text{sen}} = I_{\text{d}} / I_{\text{r}}$, 假设两端系统等值电势幅值相等, 即 $E_N = E_M e^{j\delta}$ 。

以线路发生不对称接地故障为例, 对于正序网络, 其灵敏度系数可结合式(3) — (5) 进行计算:

$$K_{\text{Isen}} = \frac{[Z_{1N} + (1-k)Z_1] + e^{j\delta}(Z_{1M} - Z_c + kZ_1)}{[Z_{1N} + (1-k)Z_1] - e^{j\delta}(Z_{1M} - Z_c + kZ_1) + 2R_g(1 - e^{j\delta})} \quad (9)$$

文献[7]给出了零序网络的灵敏度系数, 如式(10)所示(负序网络的灵敏度系数类似, 不再赘述)。

$$K_{\text{0sen}} = \frac{Z_{0N} + Z_{0M} + Z_0 - Z_c}{Z_{0N} - Z_{0M} + Z_c + Z_0 - 2kZ_0} \quad (10)$$

由式(10)可直接看出, 零序网络下, 串补度的增大和 k 值的增大均会使灵敏度减小。但式(9)较为复杂, 不能够直观得出正序网络下灵敏度的变化趋势, 下文将进一步分类分析。

2.2 串补度对电流差动保护的影响

由文献[17]可知, 当串补度大于 50% 时, 系统发生故障时极可能发生电流反向。本文第 1 节分析也论证了该观点, 即背侧系统在大系统互联情况下具有较小的等值阻抗以及故障点距离保护较近时, 随着线路串补度的增大, 故障线路出现电流反向的概率明显增大。根据式(9), 在保证系统两端功角差和过渡电阻(取 0)一定的情况下, 假设 E_M 与 E_N 幅值相等, 正序网络下的保护灵敏度可简化为:

$$K_{\text{Isen}} = \frac{Z_\alpha + h(Z_\beta - Z_c)}{Z_\alpha - h(Z_\beta - Z_c)} \quad (11)$$

其中, $Z_\alpha = Z_{1N} + (1-k)Z_1$; $Z_\beta = Z_{1M} + kZ_1$; $h = e^{j\delta}$ 为常数。

式(11)说明保护灵敏度随串补度的增大而减小。

仅根据灵敏度系数 K_{sen} 减小并不能直接判断电流差动保护拒动, 还需要综合考虑系统等值阻抗与短路阻抗。以式(11)为例, 在实际工程中一般满足 $Z_\beta > Z_c$, 即保护灵敏度系数大于 1, 其对电流差动保护动作特性影响不大。但是考虑大串补线路的发展以及背侧系统强联, 即出现 Z_c 增大、 Z_{1M} 减小的情况时, $Z_\beta > Z_c$ 的条件不一定满足。当 $Z_\beta = Z_c$ 时, 线路处于电流反向的临界点, 电流差动保护的灵敏度将变得很低。图 3 反映了某一固定运行方式下发生线路近端故障时串补度与灵敏度系数之间的变化关系。由图可见, 当串补度超过 50% 时, 保护的灵敏度系数

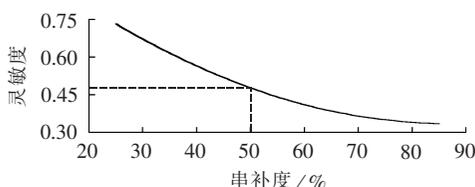


图 3 灵敏度与串补度的关系

Fig.3 Relationship between sensitivity and series compensation degree

低于 0.45, 此时若发生线路内部故障, 电流差动保护会因灵敏度不足而拒动。

2.3 综合串补度与过渡电阻对电流差动保护的影响

由前文的分析可知, 当串补线路发生区内经高阻接地短路故障时, 较小的故障电流下电容器本体保护系统不会导通。即使线路的串补度不能达到图 3 中的高串补度, 但受综合串补度与过渡电阻的影响, 电流差动保护的灵敏度仍会出现大幅降低。仍以正序分量为例, 在假设 E_M 与 E_N 幅值相等和两端系统功角差不变的条件下, 式(9)可进一步简化为:

$$K_{\text{Isen}} = \frac{Z_\alpha + e^{j\delta}(Z_\beta - Z_c)}{Z_\alpha - e^{j\delta}(Z_\beta - Z_c) + 2R_g(1 - e^{j\delta})} \quad (12)$$

由式(12)可知, 灵敏度与串补度、过渡电阻均呈反比关系, 在串补度和过渡电阻的共同作用下, K_{sen} 减小的趋势增大, 可能出现在串补度不大时电流差动保护在发生区内故障时拒动。图 4 为两端系统功角差为 30°、串补度在 25%~45% 变化的情况下, 串补线路经不同过渡电阻(0~300 Ω)发生区内接地故障时, 保护灵敏度系数与串补度、过渡电阻的关系。

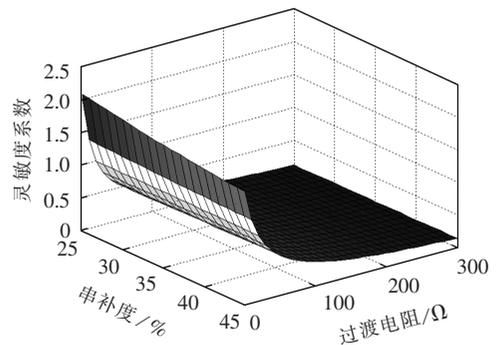


图 4 灵敏度与串补度、过渡电阻的关系

Fig.4 Relationship among sensitivity, series compensation degree and transition resistance

由图 4 可知, 在过渡电阻较小时, 串补度对电流差动保护的灵敏度降低起主要作用, 只有串补度较大时才会出现灵敏度较低的情况, 串补度在 25%~45% 之间时, 电流差动保护并不会发生拒动; 当过渡电阻超过 200 Ω 时, 过渡电阻对差动保护的灵敏度降低起主要作用, 若图 4 中电流差动保护的灵敏度系数低于 0.5, 则在串补线路发生区内故障时保护会因灵敏度不足出现拒动。

2.4 综合串补度和系统两端功角差对电流差动保护的影响

前文分析均假定系统功角不变, 但事实上系统两端功角差是不断变化的, 由式(9)可见系统两端功角差对电流差动保护的灵敏度也存在一定的影响。假设系统发生金属性接地故障, E_M 与 E_N 幅值相等, 则式(9)可简化为式(13):

$$K_{\text{Isen}} = \frac{Z_\alpha + e^{j\delta}(Z_\beta - Z_c)}{Z_\alpha - e^{j\delta}(Z_\beta - Z_c)} \quad (13)$$

由式(13)可知, $e^{j\theta}$ 随着系统两端功角差的减小而增大, 因此系统两端功角差的增大会引起 K_{1sen} 的降低。如果串补度同时增大, 则电流差动保护灵敏度将进一步降低, 差动保护可能会出现拒动。图 5 为串补度在 25%~45%、系统两端功角差在 20°~100° 间变化的情况下, 串补线路发生区内金属性接地故障时, 电流差动保护灵敏度与串补度、系统两端功角差的关系。

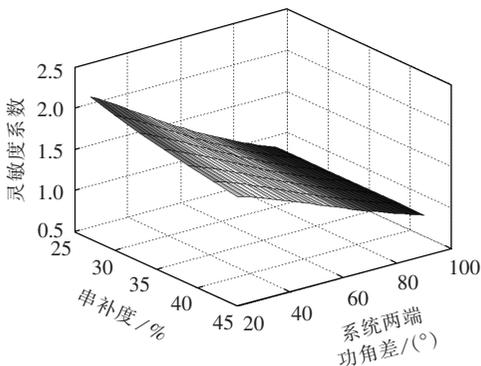


图 5 灵敏度与串补度、系统功角差的关系

Fig.5 Relationship among sensitivity, series compensation degree and power angle difference

由图 5 可知, 当系统两端功角差较小时, 电流差动保护灵敏度较高, 不影响保护动作特性; 但当系统两端功角差较大, 如大于 60° 时, 同时随着串补度的增加, 电流差动保护的灵敏度降低, 甚至出现因灵敏度不足而拒动的情况, 在系统振荡情况下发生故障时这种情况将更加明显。

3 电流差动保护改进方案

串补线路发生区内故障时的电流反向将导致电流差动保护的灵敏度下降甚至拒动。事实上电流差动保护的灵敏度会因选取的制动量和制动系数的不同而有较大差别, 即使在同一故障类型下, 电流差动保护也会因制动量或制动系数的取值不同而产生不同的动作结果。本文改变传统的基于相量和或幅值和的制动原理, 借鉴标积制动特性思想, 从串补线路两端电流幅相关系入手, 构造一种新的非线性制动保护判据。

标积制动特性可以很好地提高内部故障的灵敏度, 在发生外部故障时具有可靠的制动特性, 但当串补线路因内部故障而发生电流反向时, 标积制动特性具有明显的制动效应, 即降低了保护的制动效应。因此, 针对电流反向特性研究更加适应串补线路的制动特性势在必行。设串补线路 M 端和 N 端保护安装处的电压、电流分别为 U_M 、 I_M 和 U_N 、 I_N , 差动电流仍然为 $I_d = |I_M + I_N|$ 。由于正常运行或者发生区外故障时, 线路两端电流相位趋于相反, 发生区内故障且电流不反向时线路两端电流相位接近, 同时考虑传

统制动特性的幅值部分, 本文参考标积制动原理将常规制动量乘以 $|\sin(\theta/2)|$ (θ 为 I_M 与 I_N 之间的夹角), 即 $I'_r = \frac{|I_M - I_N|}{0.5} |\sin(\theta/2)|$ 。该制动特性在发生区外故障时保持原制动效应, 在发生区内故障时大幅降低制动效应以提高电流差动保护的灵敏度。在发生区内故障导致电流反向时, 两端电流的实际相角差并不在 180° 左右, 而是在 235° 左右, 所以此时 I'_r 较小, 从而提高了发生电流反向时电流差动保护的灵敏度。

为进一步强化电流差动保护的制动特性, 本文选择三折线式比率制动式电流差动保护提高发生区内故障, 特别是高阻接地故障时的保护灵敏度。

基于以上分析, 本文电流差动保护的制动判据如下:

$$\begin{cases} I_d > I_{set} & 0 \leq I'_r \leq I_{r1} \\ I_d > k_1 I'_r & I_{r1} < I'_r \leq I_{r2} \\ I_d > k_1(I_{r1} - I_{r2}) + k_1 I_{r2} & I_{r2} < I'_r \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} k_1 = 0.3 \\ k_2 = 0.65 \end{cases}$$

其中, k_1 、 k_2 基于一般的工程经验设定; I_{r1} 、 I_{r2} 分别为三折线式差动保护的第一拐点的制动电流和第二拐点的制动电流。

根据第 2 节的分析和式(14)所示的保护判据, 在不同串补度下, 系统发生区内、外经不同过渡电阻的接地故障时, 本文所提保护方案的制动区域分布如图 6 所示。

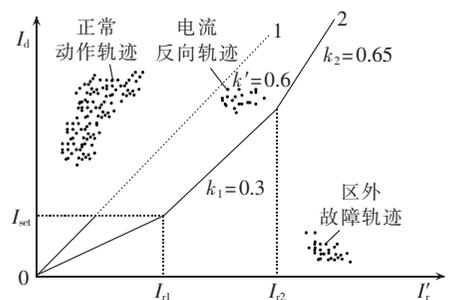


图 6 系统故障时保护动作轨迹图

Fig.6 Operating trajectory under system fault

由图 6 可知: 当系统发生区内故障或区外故障时, 本文所提电流差动保护方案均表现出了较好的性能; 即使发生电流反向, 本文所提电流差动保护方案仍能够可靠动作, 这说明改进电流差动保护判据能够有效解决串补线路发生区内故障时电流差动保护因灵敏度不足出现拒动的问题。

4 仿真实验

为验证本文提出的改进电流差动保护方案, 利用 PSCAD/EMTDC 软件对串补线路的电流差动保护灵敏度系数进行仿真, 并主要针对串补度、过渡电

阻、两端系统功角差等影响串补线路电流差动保护的因素分析差动保护判据改进前后电流差动保护灵敏度系数的变化,仿真系统如图 7 所示。故障点设置为串补装置左侧的点 F_1 、出口处点 F_2 、正向区内点 F_3 、正向区外点 F_4 。仿真系统取 500 kV 伊冯可控串补站伊敏到松北单回线路,串补设备安装在靠近伊敏母线侧。线路基本参数为: $R_1=0.0242 \Omega/\text{km}$, $R_0=0.299 \Omega/\text{km}$, $L_1=0.294 \Omega/\text{km}$, $L_0=1.33 \Omega/\text{km}$;M 端系统阻抗(忽略电阻), $Z_{M1}=7.8 \Omega$, $Z_{M0}=15 \Omega$;N 端系统

阻抗, $Z_{N1}=35 \Omega$, $Z_{N0}=79 \Omega$ 。仿真结果见表 1—3。

a. 过渡电阻的影响。

由表 1 可知,随着过渡电阻和串补度的增大,改进前、后电流差动保护判据的灵敏度系数都有所减小。但在过渡电阻较小(不大于 50Ω)时,随着串补度的增大,改进前电流差动保护的灵敏度系数降低趋势明显,甚至低于 0.4,而改进后的电流差动保护灵敏度系数均大于 1。当过渡电阻较大(超过 150Ω)时,随着串补度的增大,改进前、后电流差动保护的灵敏度系数都有小幅的降低,且都小于 1,但改进后电流差动保护的制动电流远小于改进前电流差动保护的制动电流。此时若发生高阻接地故障,则改进后的电流差动保护动作区域落在图 6 中的第 2 段动作区,第 2 段折线制动系数为 0.3,灵敏度明显满足要求,而改进前的电流差动保护发生了拒动,采用新原理的电流差动保护仍能够可靠动作。

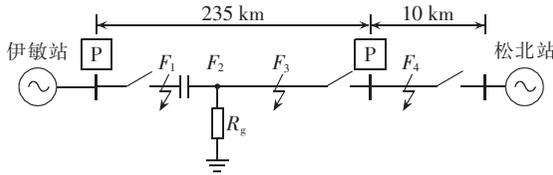


图 7 仿真系统图

Fig.7 Schematic diagram of simulation system

表 1 不同过渡电阻和串补度下电流差动保护的灵敏度

Table 1 Sensitivity of current differential protection under different series compensation degrees and transition resistances

| 串补度/% | I_d/A | R_g/Ω | K_{sen} | | I_r/A | | 串补度/% | I_d/A | R_g/Ω | K_{sen} | | I_r/A | |
|-------|---------|--------------|-----------|------|---------|------|-------|---------|--------------|-----------|------|---------|------|
| | | | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | | | | 改进前 | 改进后 | | |
| 25 | 12.88 | 0 | 1.60 | 4.97 | 8.07 | 2.59 | 25 | 5.54 | 50 | 0.82 | 2.07 | 6.76 | 2.67 |
| 35 | 12.28 | | 1.43 | 4.25 | 8.56 | 2.89 | 35 | 5.01 | | 0.69 | 1.68 | 7.23 | 2.98 |
| 45 | 11.87 | | 1.32 | 3.80 | 9.01 | 3.12 | 45 | 4.75 | | 0.62 | 1.50 | 7.63 | 3.16 |
| 65 | 11.28 | | 1.18 | 3.37 | 9.58 | 3.35 | 65 | 4.21 | | 0.53 | 1.21 | 7.94 | 3.47 |
| 75 | 10.93 | | 1.08 | 2.99 | 10.11 | 3.67 | 75 | 3.74 | | 0.46 | 1.12 | 8.14 | 3.35 |
| 85 | 10.51 | | 1.01 | 2.68 | 10.45 | 3.92 | 85 | 3.18 | | 0.36 | 1.05 | 8.72 | 3.02 |
| 25 | 2.01 | 150 | 0.44 | 0.99 | 4.59 | 2.03 | 25 | 1.41 | 300 | 0.32 | 0.75 | 4.36 | 1.88 |
| 35 | 1.89 | | 0.38 | 0.77 | 4.92 | 2.45 | 35 | 1.17 | | 0.25 | 0.59 | 4.72 | 1.99 |
| 45 | 1.75 | | 0.34 | 0.69 | 5.17 | 2.52 | 45 | 1.03 | | 0.23 | 0.51 | 4.55 | 2.01 |
| 65 | 1.45 | | 0.28 | 0.68 | 5.23 | 2.12 | 65 | 0.98 | | 0.22 | 0.49 | 4.42 | 1.98 |
| 75 | 1.15 | | 0.22 | 0.63 | 5.12 | 1.83 | 75 | 0.83 | | 0.21 | 0.44 | 4.04 | 1.88 |
| 85 | 1.01 | | 0.20 | 0.58 | 4.98 | 1.74 | 85 | 0.67 | | 0.18 | 0.40 | 3.77 | 1.68 |

表 2 不同系统功角差和串补度下电流差动保护的灵敏度

Table 2 Sensitivity of current differential protection under different values of power angle difference and series compensation degrees

| 串补度/% | I_d/A | $\delta/(^\circ)$ | K_{sen} | | I_r/A | | 串补度/% | I_d/A | $\delta/(^\circ)$ | K_{sen} | | I_r/A | |
|-------|---------|-------------------|-----------|------|---------|------|-------|---------|-------------------|-----------|------|---------|------|
| | | | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | | | | 改进前 | 改进后 | | |
| 25 | 5.85 | 90 | 0.49 | 1.00 | 12.02 | 5.86 | 25 | 6.12 | 70 | 0.56 | 1.22 | 10.84 | 5.01 |
| 35 | 5.56 | | 0.45 | 0.91 | 12.22 | 6.10 | 35 | 5.90 | | 0.54 | 1.12 | 10.99 | 5.25 |
| 45 | 5.01 | | 0.44 | 0.87 | 11.45 | 5.74 | 45 | 5.76 | | 0.52 | 1.04 | 11.05 | 5.52 |
| 65 | 4.85 | | 0.43 | 0.86 | 11.15 | 5.66 | 65 | 5.01 | | 0.47 | 0.98 | 10.63 | 5.12 |
| 75 | 4.64 | | 0.42 | 0.85 | 10.95 | 5.44 | 75 | 4.88 | | 0.46 | 0.97 | 10.50 | 5.01 |
| 85 | 4.01 | | 0.38 | 0.78 | 10.43 | 5.12 | 85 | 4.65 | | 0.45 | 0.95 | 10.23 | 4.88 |
| 25 | 6.33 | 50 | 0.65 | 1.33 | 9.73 | 4.75 | 25 | 6.54 | 40 | 0.74 | 1.54 | 8.79 | 4.24 |
| 35 | 6.19 | | 0.63 | 1.28 | 9.78 | 4.85 | 35 | 6.33 | | 0.70 | 1.43 | 8.99 | 4.44 |
| 45 | 6.17 | | 0.62 | 1.24 | 9.89 | 4.96 | 45 | 6.31 | | 0.69 | 1.38 | 9.08 | 4.57 |
| 65 | 5.23 | | 0.58 | 1.21 | 9.01 | 4.31 | 65 | 6.16 | | 0.68 | 1.34 | 9.12 | 4.59 |
| 75 | 4.98 | | 0.57 | 1.18 | 8.68 | 4.22 | 75 | 5.54 | | 0.63 | 1.33 | 8.76 | 4.16 |
| 85 | 4.61 | | 0.55 | 1.12 | 8.38 | 4.13 | 85 | 4.95 | | 0.61 | 1.31 | 8.17 | 3.78 |
| 25 | 6.79 | 30 | 0.83 | 1.91 | 8.15 | 3.56 | 25 | 6.94 | 20 | 0.91 | 2.18 | 7.65 | 3.18 |
| 35 | 6.47 | | 0.78 | 1.63 | 8.27 | 3.98 | 35 | 6.61 | | 0.85 | 1.95 | 7.79 | 3.39 |
| 45 | 6.34 | | 0.76 | 1.58 | 8.32 | 4.02 | 45 | 6.43 | | 0.82 | 1.81 | 7.88 | 3.54 |
| 65 | 6.20 | | 0.74 | 1.47 | 8.41 | 4.22 | 65 | 6.21 | | 0.81 | 1.67 | 7.63 | 3.72 |
| 75 | 5.88 | | 0.73 | 1.43 | 8.01 | 4.10 | 75 | 6.10 | | 0.80 | 1.66 | 7.58 | 3.68 |
| 85 | 5.47 | | 0.70 | 1.41 | 7.78 | 3.87 | 85 | 5.92 | | 0.79 | 1.65 | 7.49 | 3.58 |

表 3 不同故障点和串补度下电流差动保护的灵敏度

Table 3 Sensitivity of current differential protection under different series compensation degrees and fault points

| 串补度/% | I_0/A | 故障点 | K_{sen} | | I_r/A | | 串补度/% | I_0/A | 故障点 | K_{sen} | | I_r/A | |
|-------|---------|-------|-----------|------|---------|------|-------|---------|-------|-----------|------|---------|------|
| | | | 改进前 | 改进后 | 改进前 | 改进后 | | | | 改进前 | 改进后 | | |
| 25 | 2.72 | F_1 | 0.54 | 1.13 | 5.00 | 2.41 | 25 | 2.73 | F_2 | 0.50 | 0.99 | 5.50 | 2.75 |
| 35 | 2.71 | | 0.53 | 1.06 | 5.12 | 2.56 | 35 | 2.66 | | 0.45 | 0.91 | 5.85 | 2.92 |
| 45 | 2.70 | | 0.50 | 1.03 | 5.43 | 2.61 | 45 | 2.63 | | 0.45 | 0.89 | 5.87 | 2.94 |
| 65 | 2.74 | | 0.45 | 0.92 | 6.13 | 2.98 | 65 | 2.49 | | 0.42 | 0.84 | 5.90 | 2.95 |
| 75 | 2.72 | | 0.45 | 0.92 | 6.03 | 2.95 | 75 | 2.44 | | 0.42 | 0.84 | 5.84 | 2.92 |
| 85 | 2.45 | | 0.44 | 0.90 | 5.56 | 2.71 | 85 | 2.17 | | 0.40 | 0.80 | 5.42 | 2.70 |
| 25 | 2.27 | F_3 | 0.73 | 1.31 | 3.10 | 1.73 | 25 | 0.23 | F_4 | 0.08 | 0.15 | 3.01 | 1.50 |
| 35 | 2.26 | | 0.61 | 1.28 | 3.72 | 1.76 | 35 | 0.23 | | 0.07 | 0.14 | 3.37 | 1.68 |
| 45 | 2.25 | | 0.58 | 1.21 | 3.90 | 1.86 | 45 | 0.22 | | 0.06 | 0.13 | 3.54 | 1.76 |
| 65 | 2.22 | | 0.54 | 1.13 | 4.11 | 1.96 | 65 | 0.21 | | 0.05 | 0.10 | 4.16 | 2.18 |
| 75 | 2.12 | | 0.51 | 1.09 | 4.12 | 1.95 | 75 | 0.20 | | 0.05 | 0.09 | 4.12 | 2.12 |
| 85 | 1.95 | | 0.50 | 1.07 | 3.90 | 1.81 | 85 | 0.18 | | 0.05 | 0.09 | 3.69 | 1.92 |

b. 系统两端功角差的影响。

由表 2 可知,串补设备出口短路时,改变线路串补度和系统两端功角差对电流差动保护的灵敏度具有明显的影响。当系统两端功角差较小(小于 50°)时,无论串补度如何变化,改进后电流差动保护的灵敏度系数均能够超过 1,但改进前电流差动保护的灵敏度系数小于 1。随着串补度和系统两端功角差同时增大,如当系统两端功角差大于 70° 时,改进前电流差动保护的灵敏度系数已低于 0.6,存在因灵敏度不足而拒动的可能,而改进后的电流差动保护的动作区落在图 6 中的第 3 段动作区,灵敏度系数远大于 0.65,保护能正确动作。

c. 不同故障位置的影响。

由表 3 可知,不论在串补线路区外/区内故障或者保护边界发生故障时,改进后的电流差动保护均能够作出正确反应。即使当串补线路发生严重的出口短路时,改进后的电流差动保护灵敏度系数不会低于 0.8,而改进前的电流差动保护在串补度未超过 50% 时就存在拒动现象。发生区外故障时,改进后的电流差动保护的灵敏度系数较改进前区别不大,远小于图 6 中第 3 段折线系数 0.65,不足以引起电流差动保护误动。

5 结论

本文分析了在电容器本体保护系统未触发的前提下,串补线路发生区内故障时,受背侧系统等值阻抗、串补度、故障点位置等因素综合影响的电流反向规律,并指出在系统两端功角差和过渡电阻的作用下,电流反向降低了高串补度的条件。

针对电流反向导致电流差动保护拒动的风险,本文提出了一种基于串补线路两端电流幅相关系的电流差动保护改进判据。与传统的电流差动保护相比,在电流反向或者发生高阻接地故障时,改进判据具有较高的灵敏度。最后基于伊冯串补线路模型验证了的改进判据的有效性。

参考文献:

- [1] 焦在滨,张梦瑶,何世恩,等. 基于频域模型识别的串补线路保护方案[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):186-193.
JIAO Zaibin,ZHANG Mengyao,HE Shien,et al. A distance protection scheme of series compensated lines based on model identification in frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(4):186-193.
- [2] 刘淑磊,陈福锋,何奔腾. 基于补偿点阻抗的阻抗角特性的串补线路距离保护方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(21):70-73.
LIU Shulei,CHEN Fufeng,HE Benteng. Distance protection principle for series compensated lines based on the impedance angle of the compensated point[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(21):70-73.
- [3] 王育学,尹项根,张哲,等. 基于参数识别原理的串补线路距离保护[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):98-102.
WANG Yuxue,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Distance protection for series compensated lines based on parameter identification principle[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):98-102.
- [4] 索南加乐,谈树峰,何世恩,等. 基于模型识别的串补线路方向元件[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):66-70.
SUONAN Jiale,TAN Shufeng,HE Shien,et al. Directional element for series compensated lines based on model identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(14):66-70.
- [5] 高超,郑涛,毕天姝,等. 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,ZHENG Tao,BI Tianshu,et al. 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] 朱晓彤,黄蕙,徐晓春,等. 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):151-155.
ZHU Xiaotong,HUANG Hui,XU Xiaochun,et al. Influence and countermeasures for current reversal on differential protection of series compensated lines[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2015,39(14):151-155.
- [8] 马静,裴讯,马伟,等. 基于故障分量虚拟阻抗的线路差动保护原理[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):58-69.
MA Jing,PEI Xun,MA Wei,et al. Differential protection principle based on virtual impedance of fault component for power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):58-69.
- [9] XU Z Y, DU Z Q,RAN L,et al. A current differential relay for a 1000 kV UHV transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(3):1392-1399.
- [10] 肖仕武,程艳杰,王亚,等. 基于贝瑞隆模型的半波长交流输电线路电流差动保护原理[J]. 电网技术,2011,39(5):46-50.
XIAO Shiwu,CHENG Yanjie,WANG Ya,et al. A Bergeron model based current differential protection principle for UHV half-wave length AC transmission line[J]. Power System Technology,2011,39(5):46-50.
- [11] 刘凯. 超/特高压线路差动保护电容电流补偿方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):94-98.
LIU Kai. Capacitive current compensation method for differential protection of EHV/UHV lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):94-98.
- [12] 丛伟,张琳琳,程学启,等. 基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):26-30.
CONG Wei,ZHANG Linlin,CHENG Xueqi,et al. Criterion of current differential protection based on amplitude and phase difference of fault current[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):26-30.
- [13] SANJAY D,SOMAN S A,CHANDORKAR M C. Adaptive current differential protection schemes for transmission line protection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(4):1832-1841.
- [14] 夏经德,索南加乐,王志恩,等. 基于纵联阻抗相角的输电线路纵联保护[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):20-27.
XIA Jingde,SUONAN Jiale,WANG Zhien,et al. Transmission line pilot protection based on pilot impedance angle[J]. Electric power Automation Equipment,2011,31(5):20-27.
- [15] 周启文,潘勇斌,王德昌,等. 500 kV 串补系统中火花间隙系统研究[J]. 高压电器,2012,48(8):40-44.
ZHOU Qiwen,PAN Yongbin,WANG Dechang,et al. Improvement of spark gap system for 500 kV series compensation system[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(8):40-44.
- [16] 李斌,曾红艳,范瑞卿,等. 基于故障分量的相位相关电流差动保护[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):54-58.
LI Bin,ZENG Hongyan,FAN Ruiqing,et al. Phase correlation current differential protection based on fault component[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):54-58.
- [17] 唐萃,尹项根,戚宣威,等. 大串补度输电线路的电流差动保护分析与对策[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):156-163.
TANG Cui,YIN Xianggen,QI Xuanwei,et al. Analysis and countermeasures of current differential protection on transmission line with high series compensation degree[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):156-163.

作者简介:



李振兴

李振兴(1977—),男,河南许昌人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制(E-mail:lzx2007001@163.com);

王玲(1991—),女,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制(E-mail:478242327@qq.com);

黄悦华(1972—),男,湖北荆州人,教授,博士,主要研究方向为控制理论和控制工程、电机与控制、计算机应用(E-mail:hyh@ctgu.edu.cn)。

Analysis of current differential protection maloperation in power transmission line with high series compensation and corresponding improved protection method

LI Zhenxing¹,WANG Ling¹,HUANG Yuehua¹,MENG Xiaoxing²,LI Zhenhua²

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

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: High series capacitor compensation device is more and more widely applied in EHV power transmission system. With the complex interconnection of multiple power systems, the system impedance in the back of transmission line with high series compensation maybe smaller in a certain operating mode, thus the fault current may reverse during the internal line fault, due to which, the current differential protection in transmission line with high series compensation may be rejected because of the lack of sensitivity. On this basis, the reasons of current reversion in power transmission line with high series compensation and its effect on differential protection are analyzed. The operation characteristics of differential protection under the multiple factors such as different series compensation degree, power angle difference and transition resistance are emphatically studied. Furthermore, the improved criteria based on the current amplitudes and phases at both sides of power transmission line with high series compensation are proposed to avoid the maloperation of current differential protection, which effectively improve the low protection sensitivity during the internal fault of transmission line with high series compensation. The simulative results show that the improvement scheme can obviously increase the protection sensitivity.

Key words: series compensation equipment; EHV power transmission line; reverse current; current differential protection; sensitivity analysis