

基于瞬时功率理论的输电线路分相电流差动保护

邓翔天¹,袁荣湘¹,肖振锋²,李体明¹,李开文¹,王娅镭¹

(1. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学 动力与机械学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 为了消除分布电容电流对电流差动保护的影响,提出一种基于瞬时功率理论的输电线路分相电流差动保护原理。对线路两端的三相瞬时电流进行傅里叶变换,并对变换后的电流进行低通滤波后得到线路两端的三相基波有功电流分量,利用其构成差动电流保护判据。利用 PSCAD 软件建立 500 kV 输电线路仿真模型对所提差动保护原理进行仿真验证,仿真结果表明,其不受过渡电阻和分布电容电流的影响,可快速、准确地区分各种故障类型。

关键词: 超高压输电; 特高压输电; 继电保护; 分相电流差动保护; 瞬时功率理论; 单相有功电流; 傅里叶变换; 仿真

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.013

0 引言

电流差动保护原理简单,能够适应各种复杂的系统运行状态,具备天然的选相能力,因而常被用作超(特)高压输电线路^[1-2]和大规模风电场并网^[3-4]的主保护。但在实际应用中,电流差动保护易受分布电容电流的影响,尤其是随着特高压远距离输电技术的应用,分布电容电流已成为制约电流差动保护性能的重要因素^[5-7]。

从补偿电容电流的角度出发,文献[8-9]提出一种计算电容电流相量的补偿方法。相量补偿法能对稳态电容电流进行补偿,但对故障初始阶段的暂态电容电流无法进行有效的补偿。文献[10-12]提出了基于贝瑞隆线路模型的电容电流精确补偿算法,即贝瑞隆线模法,其在理论上能够完全补偿分布电容电流,但其对采样频率、线路长度、线路参数的准确性等均有严格的要求,在工程实践中还存在诸多制约因素。文献[13-15]提出时域电容电流补偿算法,该算法在一定程度上突破了贝瑞隆线模法实用化的瓶颈,但仍然需要知道线路的精确参数;然而线路参数受运行方式、外界条件影响较大,很难得到精确值。从差动保护新原理出发,文献[16-17]提出一种基于模型识别的纵联差动保护判据,该方法从数学原理上解决了电容电流影响的问题,但原理、判据构造复杂,且仍需要线路参数,实际应用难度大。文献[18]提出一种利用差流中电阻性分量构造差动保护判据的方法,该方法的动作量中不包含电容电流,故避免了分布电容电流的影响;但该方法假设故障后电压相量等于故障前电压相量以提取电阻性电流,不适用于小过渡电阻的情况,因而不具备普遍的适用性。

为了解决传统功率定义体系不能满足现代电力装置发展需求的问题,研究人员提出并发展了瞬时功率理论体系,目前已将其成功应用于无功补偿、有源滤波和高压直流输电等诸多工程领域。在电力系统继电保护方面,瞬时功率理论也有许多应用。文献[19]利用瞬时功率理论计算故障时线路两侧系统的无功功率损耗,构建了新型的功率方向元件。该功率方向元件较传统方向元件在灵敏性、可靠性和快速性上均有较大改进。文献[20-21]提出了基于瞬时功率理论的电力变压器保护原理,其不受 Y/Δ 接线方式、铁损和涌流等因素影响。在线路保护方面,文献[22]利用瞬时功率理论提取线路电流的直流、反相和同极分量,并利用神经网络学习机进行相位估计进而实现故障判别。

值得注意的是,传统三相瞬时无功理论使用了三相变换,无法直接得到故障相。为解决上述问题,本文在瞬时功率理论的框架下,提出一种单相有功电流分量快速提取算法:通过三相数字锁相环获得线路两侧基波正序电压的相位信息^[23-24],将线路电流简单变换和滤波后得到与电压同相的基波有功电流分量(简称有功电流分量)的幅值;而分布电容电流和并联电抗器电感电流经过相同变换后与有功电流分量正交,故采用有功电流分量构造的差动保护判据从原理上不受电容电流的影响。本文使用 PSCAD 建立 500 kV 输电线路模型,对该保护算法进行了仿真验证。

1 原理分析

1.1 输电线路模型

高压输电线路常用 PI 型等效模型。假设一条装有并联电抗器的 500 kV 输电线路 MN,其系统图与等效电路图如图 1 所示。其中, U_M 、 U_N 为线路两端电

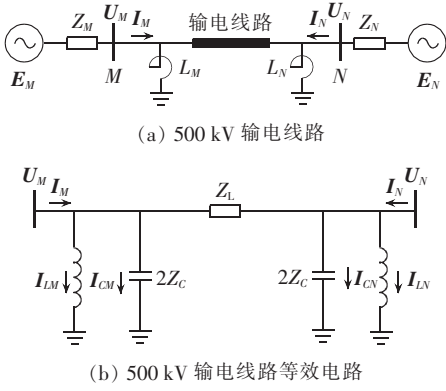


图 1 500 kV 输电线路及其等效电路
Fig.1 500 kV power transmission line and its equivalent circuit

压相量; I_M, I_N 为线路两端电流相量; Z_L 为线路阻抗; Z_C 为线路对地等效电容容抗; L_M, L_N 为装设在线路两端的并联电抗器; Z_{LM}, Z_{LN} 为并联电抗器的阻抗; I_{CM}, I_{CN} 为线路两端等效电容电流相量; I_{LM}, I_{LN} 为流经电抗器的电感电流。

正常运行或区域外故障时, 线路段 MN 的差流 I_{cd} 为:

$$I_{cd} = I_M + I_N = I_{LM} + I_{LN} + I_{CM} + I_{CN} = \frac{U_M}{Z_{LM}} + \frac{U_N}{Z_{LN}} + \frac{U_M}{2Z_C} + \frac{U_N}{2Z_C} \quad (1)$$

由基本电路原理可知: 电容电流 I_{CM}, I_{CN} 的相位分别超前电压 U_M, U_N 的相位 90° ; 电感电流 I_{LM}, I_{LN} 的相位分别滞后电压 U_M, U_N 的相位 90° 。

文献[18]提出的利用电阻性差流构造的差动保护判据在高阻故障时能够很好地提高差动保护的灵敏度, 但当过渡电阻较小时, 假设条件不再成立从而导致判据失效。本文利用单相瞬时功率理论提出了不受过渡电阻影响的“电阻性”电流分量, 即有功电流分量的提取方法。

1.2 有功电流提取

文献[25-27]给出了单相电路瞬时谐波以及无功电流的实时检测方法, 由于本文只需实时检测有功电流分量, 因此可对该方法做适当简化。

假设线路电流瞬时值为 $i_s(t)$, 则有:

$$i_s(t) = i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (2)$$

其中, $i_p(t)$ 为基波有功分量; $i_q(t)$ 为基波无功分量; $i_h(t)$ 为所有高次谐波分量。

假设电网某相电压为:

$$u_s(t) = U_m \cos(\omega t) \quad (3)$$

其中, U_m 为相电压幅值; ω 为电压角速度。

用傅里叶级数表示式(2)可得:

$$i_s(t) = I_p \cos(\omega t) + I_q \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (4)$$

其中, I_p 为有功电流的幅值; I_q 为无功电流的幅值; I_n

和 φ_n 分别为 n 次谐波电流的幅值与初相角。

式(4)两边同乘以 $2 \cos(\omega t)$, 可得:

$$2 \cos(\omega t) i_s(t) = I_p + I_p \cos(2\omega t) + I_q \sin(2\omega t) + \sum_{n=3}^{\infty} I_n \{ \cos[(n+1)\omega t + \varphi_n] + \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n] \} \quad (5)$$

式(4)两边同乘以 $2 \sin(\omega t)$, 可得:

$$2 \sin(\omega t) i_s(t) = I_q + I_p \sin(2\omega t) - I_q \cos(2\omega t) + \sum_{n=3}^{\infty} I_n \{ \sin[(n+1)\omega t + \varphi_n] + \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n] \} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知, 经过变换后的电流均含有直流分量和交流分量。由瞬时功率理论的概念可知, 直流分量对应变换前的基波分量, 交流分量对应变换前的谐波分量。理论上, 使用截止频率小于 2 倍基波频率的低通滤波器(LPF)对使用式(5)变换后的信号进行滤波, 即可得到对应的有功电流分量的幅值。

根据系统的序网络可知, 正序电压只由系统两侧电源提供, 故相对于单相电压锁相环, 采用三相电压锁相环能够更好地抑制短路发生位置以及电压谐波等因素的影响[23-24]。单相有功电流瞬时检测算法框图如图 2 所示。其中, u_{abc} 为三相电压瞬时值; i_a, i_b, i_c 为三相电流瞬时值; i_{ap}, i_{bp}, i_{cp} 为三相电流的有功电流分量。

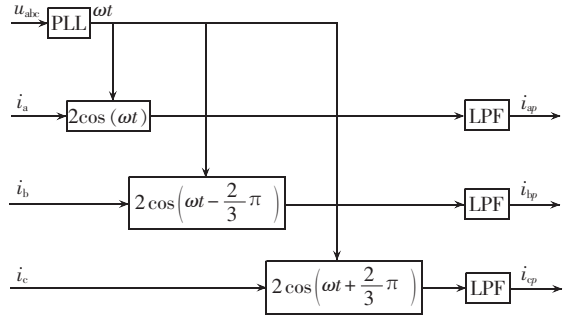


图 2 三相有功电流提取
Fig.2 Extraction of three-phase active-power current components

2 有功电流差动保护

2.1 内部故障分析

当线路内部发生接地故障时, 假设 M 侧故障电流 i_{fM} 为:

$$i_{fM} = i_{pM} + i_{qM} + i_{hM} \quad (7)$$

其中, i_{pM} 为 M 侧故障电流的基波有功分量; i_{qM} 为 M 侧基波无功电流分量; i_{hM} 为 M 侧高次谐波分量。

将式(5)和图 2 所示的基波有功电流分量提取方法应用于式(7)可得该采样时刻基波有功电流分量 i_{pM} 的值为:

$$i_{pM} = I_{pM} \quad (8)$$

其中, I_{pM} 为 M 侧基波有功电流的幅值。

同理可得, N 侧故障电流的有功分量 i_{pN} 为:

$$i_{pN} = I_{pN1} \quad (9)$$

其中, I_{pN1} 为 N 侧基波有功电流的幅值。

假设 M 、 N 侧锁相环输出的相角分别为 $\theta_M(t)$ 和 $\theta_N(t)$, 则两侧电压相量的相位差 θ_{MN} 为:

$$\theta_{MN} = \theta_M(t) - \theta_N(t) \quad (10)$$

M 、 N 侧的基波有功电流相量 I_{pM1} 、 I_{pN1} 的相位关系如图 3 所示。

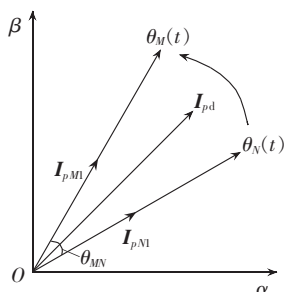


图 3 区内故障时线路两端有功电流分量的相位关系

Fig.3 Phase relation of active-power current components between two line terminals for in-zone faults

由图 3 可知, 基波有功电流差流相量 I_{pd} 为:

$$I_{pd} = I_{pM1} + I_{pN1} \quad (11)$$

根据余弦定理, M 、 N 侧基波有功电流差流的模值为:

$$|I_{pd}| = |I_{pM1} + I_{pN1}| = \sqrt{i_{pM}^2 + i_{pN}^2 + 2i_{pM}i_{pN} \cos \theta_{MN}} \quad (12)$$

2.2 正常运行以及外部故障分析

正常运行或外部故障时, 线路基波有功电流分量相量如图 4 所示。

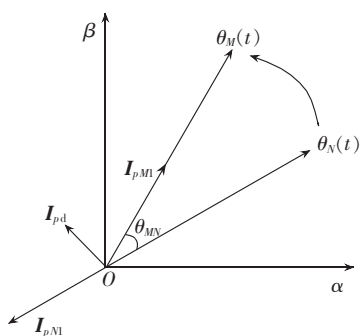


图 4 正常运行或区外故障时线路两端有功电流分量的相位关系

Fig.4 Phase relation of active-power current components between two line terminals for normal operation and out-zone faults

M 、 N 侧基波有功电流差流模值为:

$$|I_{pd}| = |I_{pM1} - I_{pN1}| = \sqrt{i_{pM}^2 + i_{pN}^2 - 2i_{pM}i_{pN} \cos \theta_{MN}} \quad (13)$$

当 $\theta_{MN} \approx 0^\circ$ 时, 由于区域内无电阻性地支路, 故两端有功电流大小相等、方向相反, 基波有功电流差流为 0。

2.3 保护判据

由于当最大正常运行方式或外部故障时线路两侧基波正序电压相位差并不一定近似为 0° , 故此时的

有功电流差流也不一定近似为 0° 。为了增强有功电流差动保护判据应对正常运行和外部故障时的选择性, 本文提出了带制动系数的有功电流差动保护, 其判据如下:

$$|I_{pM1} + I_{pN1}| > K_{ap} |I_M - I_N| \quad (14)$$

其中, $|I_{pM1} + I_{pN1}|$ 为动作量; K_{ap} ($0 < K_{ap} < 1$) 为比例制动系数; $|I_M - I_N|$ 为制动量; I_M 和 I_N 分别为 M 、 N 侧全电流的相量, 分别采用小矢量算法和 5 ms 数据窗幅频特性一致的正交相量滤波器 (IMFC 滤波器) 计算得到^[15]。

2.4 比例制动系数 K_{ap} 的整定原则

有功电流差动保护的比例系数 K_{ap} 的整定原则为: 躲过最大负荷电流和最大外部故障电流时的有功电流差流, 确保有功电流差动保护判据在最大运行方式和外部故障时不动作。

3 仿真实证

3.1 模型搭建

参考文献^[28], 使用 PSCAD 建立仿真模型, 如图 5 所示。系统参数: M 侧参数, $E_M = 1.05 \angle 0^\circ$ p.u., 正序等效电阻 $R_{M1} = 1.0515 \Omega$, 正序等效电感 $L_{M1} = 0.13743$ H, 零序等效电阻 $R_{M0} = 0.6 \Omega$, 零序等效电感 $L_{M0} = 0.0926$ H; N 侧参数, $E_N = 1 \angle -30^\circ$ p.u., 正序等效电阻 $R_{N1} = 26 \Omega$, 正序等效电感 $L_{N1} = 0.14298$ H, 零序等效电阻 $R_{N0} = 20 \Omega$, 零序等效电感 $L_{N0} = 0.11927$ H; 线路正序参数, $r_1 = 0.02083 \Omega/\text{km}$, $l_1 = 0.8948$ mH/km, $c_1 = 0.0129 \mu\text{F}/\text{km}$; 线路零序参数, $r_0 = 0.1148 \Omega/\text{km}$, $l_0 = 2.2886$ mH/km, $c_0 = 0.00523 \mu\text{F}/\text{km}$; 线路长度为 300 km, QF_M 为 M 侧断路器, QF_N 为 N 侧断路器, QF_{LM} 为 M 侧并联电抗断路器, QF_{LN} 为 N 侧并联电抗断路器, 并联电抗器电抗补偿度为 60° ; 故障点在 F 处, 三相电压、电流采样频率为 5 kHz; X_L 为三相并联电抗器的感抗; X_N 为中性点电抗器的感抗。

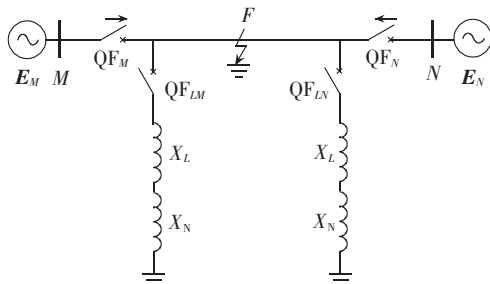


图 5 500 kV 输电线路仿真模型

Fig.5 Simulation model of 500 kV power transmission line

3.2 空载合闸情况下的仿真实证

假设 N 侧断路器 QF_N 断开, 并联电抗器退出运行, M 侧断路器在 1.2 s 时合闸。由于线路空载合闸时的电流主要为电容电流, 因此空载合闸情况最能考察不同方案抑制电容电流的能力。有功电流法、时

域补偿法及传统方法的差流如图 6 所示。由图可知,未采用补偿措施的传统方法差流最大值为 0.48 kA,采用时域补偿法和有功电流法的差流的最大值分别为 0.096 kA 和 0.048 kA;传统方法差流的稳态值为 0.4 kA,时域补偿法的稳态值为 0.028 kA,有功电流法的稳态值几乎为 0。分析可知,有功电流法对暂态电容电流的抑制效果优于时域补偿法,并且能够完全抑制稳态电容电流。

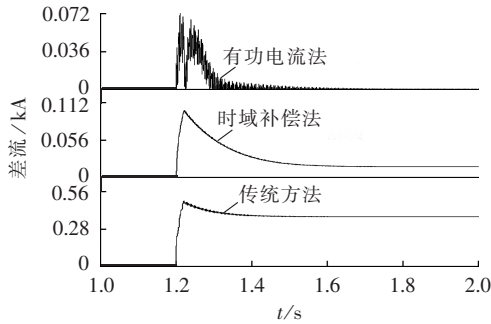


图 6 空载合闸时,3 种保护判据得到的差动电流
Fig.6 Differential current of no-load closure for three criteria

3.3 外部故障仿真验证及比例系数 K_{ap} 的整定

假设系统的最大运行方式为: $E_M=1.05 \angle 0^\circ$ p.u., $E_N=1 \angle -60^\circ$ p.u., 在 1s 时 M 、 N 侧外部出口分别发生三相金属性短路接地故障。以 A 相为例,动作量与制动量的比值 K'_{ap} 如图 7 所示, K'_{ap} 的计算公式如下:

$$K'_{ap} = \frac{|I_{pM} + I_{pN}|}{|I_M - I_N|} \quad (15)$$

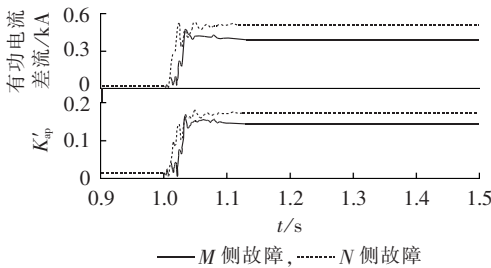


图 7 区外故障时,本文判据得到的 A 相有功差动电流及其与制动电流的比值
Fig.7 Phase-A differential active-power current obtained by proposed criterion and its ratio to breaking current for out-zone faults

由图 7 可知,最大运行方式下发生外部故障时,其有功差流最大可达到 0.6 kA,对应的动作量与制动量的比值 K'_{ap} 为 0.19。以 1.2 倍裕量整定比例制动系数 K_{ap} ,可得 $K_{ap}=0.228$ 。

3.4 内部故障仿真验证

3.4.1 不同故障类型时的有功差流

当故障点 F 位于线路 MN 中点时,假设在 1s 时分别发生金属性 A 相单相接地故障、AB 相间短路故障、AB 相间短路接地故障和三相短路接地故障, A、B、C 相的有功电流差流如图 8 所示。

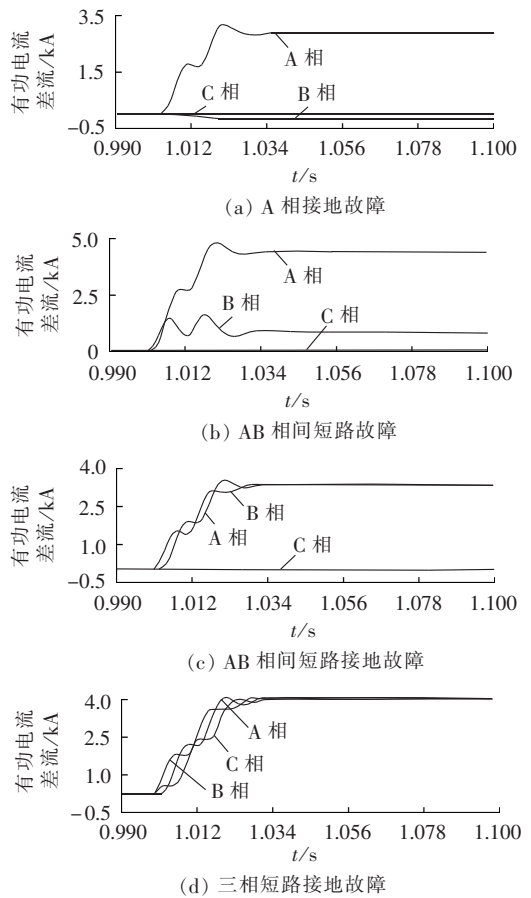


图 8 发生不同类型的区内故障时,本文判据得到的三相有功差动电流
Fig.8 Three-phase differential active-power currents obtained by proposed criterion for different in-zone faults

A、B、C 相对应的 K'_{ap} 如图 9 所示。由图 7 和图 9 可知,有功电流分相差动保护能够很好地识别内部外部金属性短路故障,并具备选相能力。

3.4.2 并联电抗器对有功电流差流的影响

控制断路器 QF_{LM} 和 QF_{LN} 的分合,以控制并联电抗器投运状态。当线路中点位置在 1s 时发生经不同过渡电阻接地的单相短路故障时,故障相有功电流差流波形如图 10 所示。由图可知:系统正常运行时,并联电抗器对有功电流差流不造成影响;发生金属性短路接地故障后,投入并联电抗器比未投入情况下的有功电流差流低 7%;当过渡电阻为 500Ω 时,投入并联电抗器比未投入情况下的有功电流差流低 5%。综合分析,并联电抗器的投运情况对有功电流差流的影响较小,可忽略不计。

3.4.3 过渡电阻的影响

由式(14)可知,有功电流差动保护判据的浮动门槛值 I_{pres} 为:

$$I_{pres} = K_{ap} |I_M - I_N| \quad (16)$$

传统带制动系数的电流差动保护判据为:

$$|I_M + I_N| = K_1 |I_M - I_N| \quad (17)$$

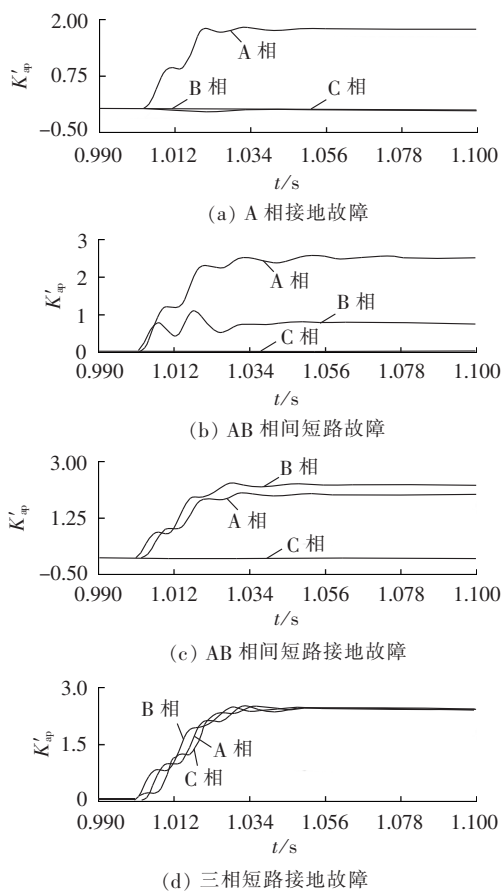


图 9 发生不同类型的区内故障时,本文判据得到的有功差动电流与制动电流的比值

Fig.9 Ratio of differential active-power current obtained by proposed criterion to breaking current for different in-zone faults

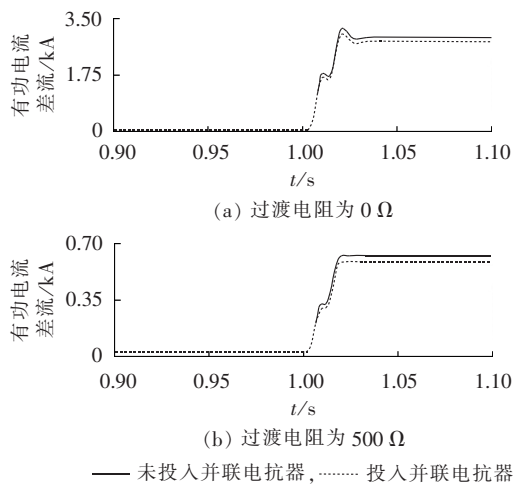


图 10 投入并联电抗器前后,本文判据得到的有功差动电流

Fig.10 Differential active-power current obtained by proposed criterion, with and without shunt reactor

同理,传统带制动系数的电流差动保护判据的浮动门槛值 I_{res} 为:

$$I_{res} = K_t |I_M - I_N| \quad (18)$$

以单相短路接地故障为例,通过设置不同的单相

短路接地过渡电阻值分析传统电流差动保护判据和有功电流差动保护判据对过渡电阻的耐受能力。假设单相接地故障位于线路 MN 内距母线 N 的 1 km 处,过渡电阻取值范围为 50~900 Ω,以 50 Ω 为步进。在相同条件下,传统带制动系数的电流差动保护的比例系数 K_t 整定为 0.7。传统电流差动保护的差流与有功电流差流及各自对应的浮动门槛值见图 11。

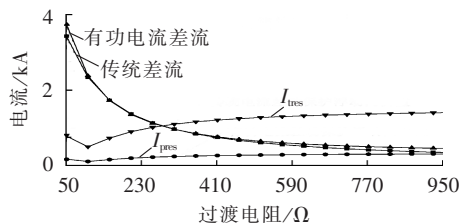


图 11 过渡电阻不同的单相接地故障下,传统电流差动保护判据和本文判据得到的差动电流及其浮动门槛值

Fig.11 Differential active-power current obtained by traditional and proposed criteria and corresponding floating thresholds for different transition resistances of single-phase grounding fault

由图 11 可知:发生内部故障时,在相同过渡电阻条件下,有功电流差流略低于传统差流;随着过渡电阻的不断增大,有功电流差动保护浮动门槛值的增加幅度明显小于传统电流差动保护浮动门槛值的增加幅度。其原因为:内部故障时,传统差流由电阻性和电容性分量构成,且电阻性分量为主要成分,而有功电流差流只包含电阻性分量,故在相同过渡电阻条件下,二者差异较小。在外部故障或空载合闸时,有功电流差流明显小于传统差流,故有功电流差动保护的整定值小于传统电流差动保护的整定值,确保了有功电流差动保护判据在高阻接地故障时仍然可正确区分内外部故障。

在相同条件下对采用了时域补偿法的电流差动保护判据进行整定,按照式(19)计算保护判据的灵敏度系数 S 。

$$S = \frac{\text{动作量}}{\text{浮动门槛值}} \quad (19)$$

不同方法的灵敏度曲线见图 12。由图 12 可知,当过渡电阻大于 300 Ω 时,未采取补偿措施的判据已无法准确判断内部故障;当过渡电阻大于 600 Ω 时,时域补偿法也不能准确判断内部故障;当过渡电阻达到 900 Ω 时,本文提出的有功电流法仍然可以准确

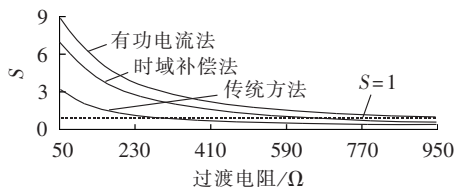


图 12 灵敏度曲线
Fig.12 Sensitivity curves

判断内部故障。分析发现:在抑制电容电流影响和过渡电阻能力方面,有功电流法明显优于时域补偿法和传统差动保护方法;此外,不同于时域补偿法,有功电流法无需使用线路阻抗的参数,提高了保护算法的适应性。

3.4.4 动作时间

不同区域内故障条件下的有功电流法保护判据的动作时间如表 1 所示,其中 θ_0 为故障初相角。分析可知,有功电流分相差动保护判据能在 10 ms 内准确识别出过渡电阻为 900 Ω 及以下的各类型短路故障。

表 1 不同故障下,本文保护的動作时间
Table 1 Operating time of proposed protection for different faults

故障点与母线 M 的距离/km	故障 类型	过渡电 阻/ Ω	动作时间/ms			
			$\theta_0=0^\circ$	$\theta_0=30^\circ$	$\theta_0=60^\circ$	$\theta_0=90^\circ$
10	AG	0.1	5.2	5.2	5.0	5.0
		900	8.2	8.0	8.0	8.0
	AB	0.1	5.0	4.8	4.8	4.8
		900	7.8	7.8	7.8	7.6
	ABG	0.1	4.8	4.6	4.8	4.6
		900	7.8	7.8	7.6	7.8
	ABCG	0.1	5.0	5.0	5.0	5.0
		900	8.0	7.8	7.8	8.0
150	AG	0.1	5.4	5.2	5.2	5.2
		900	8.2	8.0	7.8	7.8
	AB	0.1	5.4	5.4	5.2	5.0
		900	8.0	7.8	7.8	7.8
	ABG	0.1	5.0	5.2	5.2	5.2
		900	7.8	7.8	7.8	7.8
	ABCG	0.1	5.4	5.2	5.0	5.2
		900	8.0	8.0	8.0	7.8
290	AG	0.1	5.6	5.4	5.4	5.4
		900	8.2	8.0	8.0	8.0
	AB	0.1	5.4	5.2	5.2	5.0
		900	8.0	7.8	7.8	7.9
	ABG	0.1	5.4	5.2	5.0	5.0
		900	7.8	7.8	7.8	7.6
	ABCG	0.1	5.6	5.4	5.4	5.2
		900	8.2	8.0	8.0	8.0

4 结论

a. 本文利用单相瞬时功率理论提出了一种单相有功电流提取方法:使用三相锁相环提取电压的相位信息,将电流变换至与基波正序电压相量同步旋转的坐标系上以获得电流的有功分量,避免了电容电流的影响。

b. 利用线路电流的有功分量,本文提出了差动保护新方案:有功电流分相差动保护。该保护判据从原理上解决了对地分布电容电流对传统差动保护的影响,提高了电流差动保护的灵敏性,并具有天然的选相能力。

c. 有功电流差动保护算法仅需线路两端的电压

电流瞬时值,不需要使用线路阻抗参数。与时域补偿法相比,计算量较小,且具有更好的耐过渡电阻能力。

此外,有功电流差动保护方法在同杆多回输电线路、变压器差动保护和发电机保护等电力设备保护领域的应用值得深入研究。

参考文献:

- [1] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2010:118-120.
- [2] 贺家李,李从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京:中国电力出版社,2004:87-88.
- [3] 张保会,王进,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):1-5,11.
ZHANG Baohui,WANG Jin,YUAN Bo,et al. Impact of wind farm integration on relay protection (4):performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):1-5,11.
- [4] 张保会,原博,王进,等. 风电接入对继电保护的影响(七)——风电场送出电网继电保护配置研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):1-5.
ZHANG Baohui,YUAN Bo,WANG Jin,et al. Impact of wind farm integration on relay protection (7):analysis of relay protection configuration for wind farm outgoing power grid [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):1-5.
- [5] 贺家李,李永丽,郭征,等. 特高压输电线路继电保护配置方案(一)——特高压输电线路的结构与运行特点[J]. 电力系统自动化,2002,26(23):1-6.
HE Jiali,LI Yongli,GUO Zheng,et al. Relay protection for UHV transmission lines part one construction and operation charteristion [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(23):1-6.
- [6] 贺家李,李永丽,李斌,等. 特高压输电线路继电保护配置方案(二)——保护配置方案[J]. 电力系统自动化,2002,26(24):1-6.
HE Jiali,LI Yongli,LI Bin,et al. Relay protection for UHV transmission lines part two disposition of relay protection [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(24):1-6.
- [7] 李鹏,李莉,李玉海. 电力主设备继电保护存在的问题及对策[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):141-145.
LI Peng,LI Li,LI Yuhai. Problems of protections for main equipment and countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):141-145.
- [8] 丁蕾,房鑫炎. 基于电容电流半补偿的高压电力电缆分相电流差动保护研究[J]. 电网技术,2005,29(4):45-49.
DING Lei,FANG Xinyan. Research on capacitance current compensation based differential current protection for high voltage power cable [J]. Power System Technology,2005,29(4):45-49.
- [9] 李岩,陈德树,张哲,等. 超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析[J]. 继电器,2001,29(6):6-9.
LI Yan,CHEN Deshu,ZHANG Zhe,et al. The emulation analysis for the influence of capacitance current of UHV transmission line on differential current protection and compensating countermeasure [J]. Relay,2001,29(6):6-9.
- [10] 肖仕武,程艳杰,王亚. 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, 35(9):46-50.
- XIAO Shiwu, CHENG Yanjie, WANG Ya. A Bergeron model based current differential protection principle for UHV half-wavelength AC transmission line[J]. Power System Technology, 2011, 35(9):46-50.
- [11] 吴通华, 郑玉平, 朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12):61-67.
- WU Tonghua, ZHENG Yuping, ZHU Xiaotong. Current differential protection based on transient capacitance current compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12):61-67.
- [12] 郑玉平, 吴通华, 丁琰, 等. 基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23):50-55.
- ZHENG Yuping, WU Tonghua, DING Yan, et al. Applied criterion of current differential protection based on bergeron model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23):50-55.
- [13] WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Instantaneous value and equal transfer processes-based current differential protection for long transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1):289-299.
- [14] 索南加乐, 杨铖, 杨忠礼, 等. 用于同杆双回线保护的时域电容电流的分相补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1):77-81.
- SUONAN Jiale, YANG Cheng, YANG Zhongli, et al. Study of time-domain compensation algorithm of capacitive current for parallel transmission lines protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1):77-81.
- [15] 索南加乐, 张烽宁, 齐军, 等. Π 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5):12-18.
- SUONAN Jiale, ZHANG Yining, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensation algorithm on Π -model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5):12-18.
- [16] 索南加乐, 马超, 康小宁, 等. 利用电流模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19):109-116.
- SUONAN Jiale, MA Chao, KANG Xiaoning, et al. A novel transmission line pilot protection principle based on current model recognition[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19):109-116.
- [17] 索南加乐, 杨铖, 邵文权. 基于模量的线路模型识别纵联保护新原理[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10):21-24, 68.
- SUONAN Jiale, YANG Cheng, SHAO Wenquan. Model recognition longitudinal protection based on modules for transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10):21-24, 68.
- [18] 索南加乐, 刘凯, 张烽宁, 等. 基于电阻性差流的差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16):45-49.
- SUONAN Jiale, LIU Kai, ZHANG Yining, et al. New principle of differential protection based on the resistance component of differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16):45-49.
- [19] 古斌, 谭建成. 基于瞬时功率理论的新型功率方向元件[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2):177-182.
- GU Bin, TAN Jiancheng. A study of the novel power direction relay based on the instantaneous power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2):177-182.
- [20] SALEH S A, AKTAIBI A, AHSHAN R, et al. The development of a $d-q$ axis WPT-based digital protection for power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):2255-2269.
- [21] 马静, 王增平, 吴劫. 基于广义瞬时功率的新型变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13):78-83.
- MA Jing, WANG Zengping, WU Jie. A novel principle of transformer protection based on generalized instantaneous power[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13):78-83.
- [22] YOUSFI F L, ABDESLAM D O, BOUTHIBA T, et al. Adaline for online symmetrical components and phase-angles identification in transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3):1134-1143.
- [23] LICCARDO F, MARINO P, RAIMONDO G. Robust and fast three-phase PLL tracking system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1):221-231.
- [24] LICCARDO F, MARINO P, SCHIANO C, et al. A new robust phase tracking system for asymmetrical and distorted three phase networks[C]//11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. [S.l.]:IEEE, 2004:525-530.
- [25] 张强, 刘建政, 李国杰. 单相光伏并网逆变器瞬时电流检测与补偿控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10):50-54.
- ZHANG Qiang, LIU Jianzheng, LI Guojie. Instantaneous current detection and compensation of single-phase photovoltaic grid-connected inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10):50-54.
- [26] 陶兴华, 李永东, 孙敏, 等. 一种基于同步旋转坐标变换的单相锁相环新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6):147-152.
- TAO Xinghua, LI Yongdong, SUN Min, et al. A novel single-phase locked loop algorithm based on synchronous reference frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6):147-152.
- [27] CARUGATI I, DONATO P, MAESTRI S, et al. Frequency adaptive PLL for polluted single-phase grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5):2396-2404.
- [28] 吴大立. 输电线路保护新原理及实现技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008.
- WU Dali. Study of new principle and realization technology of transmission line protection[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2008.

作者简介:



邓翔天

邓翔天(1986—),男,湖北荆州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护、主动配电网的运行与控制(E-mail:dengxt@whu.edu.cn);

袁荣湘(1965—),男,湖南双峰人,教授,博士研究生导师,博士,长期从事电力系统继电保护研究与教学工作;

肖振锋(1985—),男,湖南郴州人,博士研究生,主要研究方向为电力电子与电能质量治理。

(下转第94页 continued on page 94)

- 与评价[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 127-131.
- HE Yongxiu, DAI Aiyang, YANG Weihong, et al. Risk identification and evaluation of urban power grid based on based fuzzy theory [J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 127-131.
- [10] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-96.
- LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, WU Di. Distribution network theory static security evaluation index research[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-96.
- [11] 郭仁桀, 王建兴. 考虑气象条件影响的电网风险评估研究[J]. 云南电力技术, 2009, 37(2): 29-43.
- GUO Renjie, WANG Jianxing. Grid risk assessment study considering the impact of weather conditions[J]. Yunnan Electric Power Technology, 2009, 37(2): 29-43.
- [12] 赵月辉. 复杂配电系统可靠性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- ZHAO Yuehui. Complex distribution system reliability[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [13] 赵珊珊, 张东霞, 印永华. 智能电网的风险评估[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 7-10.
- ZHAO Shanshan, ZHANG Dongxia, YIN Yonghua. Risk assessment of the smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 7-10.
- [14] 魏远航, 刘思革, 苏剑. 基于枚举抽样法的城市电网风险评估[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 62-66.
- WEI Yuanhang, LIU Sige, SU Jian. Risk assessment of urban power network based on enumerative sampling method[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 62-66.
- [15] 刘自发, 庞铨铨, 魏建伟, 等. 基于 IAHP 和 TOPSIS 方法的负荷密度指标计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 56-60.
- LIU Zifa, PANG Chengcheng, WEI Jianwei, et al. Load density calculation based on the IAHP and TOPSIS method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 56-60.

作者简介:



赵会茹

赵会茹(1963—), 女, 河北石家庄人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电力经济与管理、技术经济评价理论与应用;

李娜娜(1988—), 女, 天津人, 博士研究生, 研究方向为能源管理、技术经济评价理论与应用(E-mail: nancyli1007@163.com)。

Real-time risk assessment on equipment failure outage of distribution network

ZHAO Huiru¹, LI Nana¹, GUO Sen¹, LI Tianyou², ZHANG Gonglin³

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, China;

3. Fujian Electric Power Company Electric Power Research Institute, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The real-time risk assessment on the equipment failure outage of distribution network may improve the power supply reliability and reduce the outage loss. A risk assessment model is proposed for it, which contains the equipment failure rate and the equipment failure outage impact degree. The failure rate considers the real-time system factors and the environmental factors while the impact degree considers four indexes: load loss, electricity loss, power outage user-hours and weighted power outage users. The real-time risk assessment on equipment failure outage is implemented for a distribution network, verifying the correctness and real-time performance of the proposed method.

Key words: electric power distribution; electric equipments; outages; risk assessment; real-time assessment; failure rate; failure outage impact degree

(上接第 88 页 continued from page 88)

Split-phase differential current protection based on instantaneous power theory for power transmission line

DENG Xiangtian¹, YUAN Rongxiang¹, XIAO Zhenfeng², LI Timing¹, LI Kaiwen¹, WANG Yalei¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A criterion based on the instantaneous power theory is proposed for the differential current protection of power transmission line to suppress the influence of distributed capacitive currents. The three-phase instantaneous currents of two line terminals are processed by the Fourier transformation and filtered by the LPFs (Low-Pass Filters) to extract the three-phase fundamental active-power current components, which is used as the differential current protection criterion. A simulation model of 500 kV power transmission line is built with PSCAD software for verifying the proposed protection criterion and the results show that, immune to the transition resistance and distributed capacitive currents, different fault types can be rapidly and correctly distinguished.

Key words: EHV power transmission; UHV power transmission; relay protection; split-phase differential current protection; instantaneous power theory; single-phase active-power current; Fourier transforms; computer simulation