

基于母线关联出线暂态频谱信息的UPFC线路纵联保护

吕 哲, 王增平, 许琬昱, 梁嘉娣

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206)

摘要: 统一潮流控制器(UPFC)作为新一代柔性交流输电系统元件在输电线路中逐渐应用,需要对含UPFC线路的保护原理进行深入研究。通过分析UPFC对线路故障暂态影响,得出高频分量经其串联侧时发生严重衰减,使仅利用单端暂态量的保护可靠性下降。分析母线关联出线的故障暂态特征可知,同一母线的故障侧线路与非故障侧线路的电流频谱分布存在明显差异。通过采用小波能量熵提取母线各出线暂态信息,提出一种适用于含UPFC线路的方向纵联保护方案。仿真结果表明,该方案可准确识别区内、外故障及母线故障,在不同过渡电阻、故障初始角等故障情况下,均具有较好的灵敏性和可靠性。

关键词: 故障暂态量; 统一潮流控制器; 母线出线; 输电线路保护; 小波能量熵

0 引言

由于一次能源与电力负荷的逆向分布特征,中国超、特高压交直流输电技术获得广泛应用。同时,为提高输电线路的输送容量及系统稳定性,静止同步串联补偿器(SSSC)、统一潮流控制器(UPFC)等先进的柔性交流输电系统(FACTS)设备也投入实际系统运行^[1]。然而在电力电子化电力系统中,一方面交流系统故障时,容易引发直流换相失败,从电源特性上会给交流工频量保护带来不利影响^[2];另一方面,故障过程中交流线路上的FACTS设备的动态特性,也使得工频量的短路阻抗发生变化^[3-4],这些都给工频量保护造成较严重的影响。以UPFC为例,反方向故障时工频变化量方向保护容易误动,正方向故障时距离保护容易拒动^[5-6]。输电线路故障时,除工频分量外的暂态分量也蕴含着丰富的故障特征,因此探讨如何利用暂态信息提高保护性能具有重要意义。

暂态量保护的研究主要分为利用暂态高频分量和故障初始行波2个方面。在暂态高频分量方面,主要是考虑母线等值电容、阻波器的滤波作用,根据线路区内、外故障时暂态信号差异构成保护^[7-8]。文献[9-10]通过数学形态学、小波变换,提取故障暂态信号中高、低频含量差异构成线路的单端暂态量保

护。文献[11]利用小波奇异熵提取故障暂态信息,减少了信号幅值的影响,具有更高的灵敏度。文献[12]通过引入故障距离信息减少了故障初始角与过渡电阻的影响,提出了一种方向保护判据。文献[13]基于S变换建立故障时频矩阵,提出通过与样本数据库进行相似度比较来识别故障。在故障初始行波方面,往往需要电压和电流双电气量^[14]。文献[15]提出在较长时窗内比较行波幅值,可避免捕捉初始波头的问题;文献[16]基于故障行波信号时频特征的相关性,提出了一种行波保护和故障定位方法。

在含电力电子元件线路的暂态量保护研究方面,文献[17-18]对含静止同步补偿器(STATCOM)、可控串联补偿(TCSC)元件线路的单端暂态保护的适用性进行了分析。文献[19]利用线路阻波器特性,提出了采用单端信号复杂度识别SSSC的串联补偿线路故障的方法。文献[20]采用线路两端小波包熵值进行比较,提高了对含SSSC线路的串联补偿适用性,但对线路通信具有较高的要求。文献[21-23]针对含串联电容补偿的线路,提出了相应的行波保护改进算法。

目前暂态保护研究主要集中在利用线路单端量上,保护对定值有较高的依赖性,受系统参数、故障时刻等影响较大,存在一定的可靠性问题。此外,暂态量保护在含UPFC线路上的研究也较少。本文在详细探究UPFC对线路故障暂态分量的影响基础上,分析了母线各关联出线中的故障暂态特征,得出故障侧出线与其他出线存在明显差异。利用站域通

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-09-03。

上网日期: 2019-11-30。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900604); 国家自然科学基金重点资助项目(51637005)。

信技术,提出了一种基于母线关联出线暂态频谱信息的方向纵联保护方案,避免了UPFC对线路暂态量保护的不利影响。经PSCAD/EMTDC仿真验证表明,所提保护方案能够在各种故障类型及故障位置下准确识别区内、外故障,且基本不受故障初始角及过渡电阻的影响。

1 UPFC对故障暂态电流影响分析

如图1所示,UPFC可以看做是由STATCOM与SSSC元件通过直流侧电容组合起来的,可以对线路实现多种控制目标。由于直流侧电容对高频分量相当于短路,为方便分析,本文分别从UPFC的串联侧和并联侧对线路故障暂态电流影响特征进行研究。

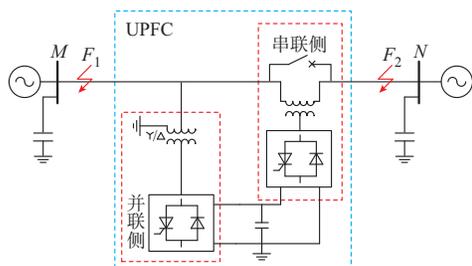


图1 含UPFC输电线路模型
Fig.1 Model of transmission line with UPFC

1.1 UPFC串联侧分析

由于UPFC的控制策略往往要经过一定时间的延迟才进行响应,因此故障后数毫秒内的暂态电流不受其影响。正常稳态时,UPFC串联侧的等值阻抗与一般意义上的电容、电感不同,其主要区别是在控制策略下所呈现出的工频阻抗值。对于暂态高频分量的影响,需要根据其物理结构进行分析。UPFC换流器一般有两电平电压源换流器(VSC)和模块化多电平换流器(MMC)这2种结构。在MMC结构中,由于变压器漏抗和桥臂电抗的存在,其子模块电容的投切对高频阻抗影响较小,各相阻抗近似相同^[24]。两电平VSC中的等值电容对于高频分量所呈阻抗同样较小。因此当线路发生故障时,无论晶闸管旁路开关(TBS)是否及时动作,换流器自身均不会对高频分量产生较大影响。而高压侧旁路断路器(HVB)的动作时间较长(通常为几十毫秒),不会对暂态电流产生影响。因此在故障暂态期间,UPFC串联侧高频阻抗主要体现在串联变压器漏抗构成的强电感特性。如附录A图A1所示,在故障暂态阶段,可将串联侧等效为电感 L 。根据彼得逊法则,对故障行波穿过UPFC串联侧的过程进行分析。

阶跃函数是计算任意波形作用下解的基础,本文以无穷长直角波为例,由附录A图A1(a)得回路微分方程为:

$$2U_0 = i_{q2}(Z_1 + Z_2) + L \frac{di_{q2}}{dt} \quad (1)$$

式中: U_0 为入射波电压; Z_1 和 Z_2 为UPFC两侧线路波阻抗; i_{q2} 为行波通过电感后的透射电流。

可解得 i_{q2} 的时域表达式为:

$$i_{q2} = \frac{2U_0 Z_2}{Z_2(Z_1 + Z_2)} (1 - e^{-\frac{t}{T_L}}) \quad (2)$$

式中: $T_L = L/(Z_1 + Z_2)$ 。

根据式(2)可得,当故障行波穿过UPFC串联侧时,由于等值电感的抑制作用,波头将发生较大拉伸,从而严重抑制了行波高频分量的传播。

1.2 UPFC并联侧分析

与1.1节分析类似,UPFC并联侧高频阻抗主要与并联侧变压器漏抗和桥臂电抗有关。如附录A图A2所示,在故障暂态阶段,同样可将并联侧等效为电感 L 。根据彼得逊法则,对故障行波穿过UPFC并联侧的过程进行分析。

根据附录A图A2(a)所示电路,得到回路微分方程为:

$$2U_0 = L \frac{di_L}{dt} + \left(i_L + \frac{L}{Z_2} \frac{di_L}{dt} \right) Z_1 \quad (3)$$

式中: i_L 为行波透射至并联支路的电流。

令 $T_L = L(Z_1 + Z_2)/Z_1 Z_2$,解得 i_L 为:

$$i_L = \frac{2U_0}{Z_1} (1 - e^{-\frac{t}{T_L}}) \quad (4)$$

从而得到行波透射电流 i_{q2} 的时域表达式为:

$$i_{q2} = \frac{2U_0}{Z_1 + Z_2} e^{-\frac{t}{T_L}} \quad (5)$$

由式(5)可知,当行波波头经过UPFC并联侧安装位置时,由于并联支路的电感电流不能突变,波头几乎不发生变化。之后由于并联侧的分流作用,行波幅值有所减小。从频域的角度分析,对于阶跃行波中的高频分量,并联侧等值电抗 $X_L = \omega L$ 将变得很大,可以近似等效为开路。

1.3 含UPFC线路故障暂态电流特征

根据上述分析,含UPFC线路的暂态等值电路如图2所示,其中 Z_1, Z_2, Z_3 为线路波阻抗,取为 300Ω 。UPFC中的等效阻抗 $Z_{L1} = sL_1, Z_{L2} = sL_2$,母线电容 $Z_C = 1/(sC)$ 。根据系统参数,UPFC串联侧变压器漏抗的标幺值一般为0.2,设串联侧等值电感 $L_1 = 4\text{mH}$ 。考虑到桥臂电感等参数,设UPFC并联侧等值电感 $L_2 = 0.1\text{H}$ 。

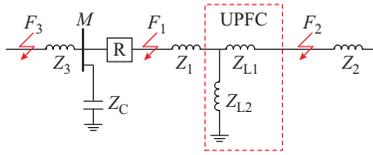


图2 UPFC暂态等值电路
Fig.2 Transient equivalent circuit of UPFC

若故障发生在 F_2 ,故障行波将穿过UPFC元件到达保护R处。由于线路特性阻抗不连续,将在UPFC安装处发生透、反射。设 $H(s)$ 为透射系数、 $K(s)$ 为反射系数,其计算公式分别为:

$$H(s) = \frac{2(Z_2 // Z_{L2})}{Z_2 // Z_{L2} + Z_1 + Z_{L1}} \quad (6)$$

$$K(s) = \frac{(Z_2 // Z_{L2}) - Z_1 - Z_{L1}}{Z_2 // Z_{L2} + Z_1 + Z_{L1}} \quad (7)$$

可得行波经UPFC元件时透、反射系数的幅频特性曲线,如附录A图A3所示。区内故障时,UPFC对暂态电流中高频分量具有较强的衰减作用。随着信号频率和UPFC串联侧等值阻抗的增加,其透射衰减的作用也越强。

为验证上述理论分析结果,如图2所示,设置故障分别发生在 F_1 和 F_2 处,比较线路有无UPFC时的暂态电流波形差异。以A相为例,保护R处的时域电流如附录A图A4所示。当含UPFC线路 F_1 处发生故障时,由于部分故障行波经UPFC反射后又透射过故障点 F_1 到达保护R处,从而使波形产生了较小差异,但暂态电流的整体变化保持一致。当故障点位于 F_2 时,相比于不含UPFC线路,由故障产生的阶跃波头被拉伸而更加平缓,暂态高频成分显著降低。对暂态电流采用Db4小波基进行3层分解,各尺度分别表示为 D_1 至 D_3 ,结果详见附录A图A5,可得频带越高,衰减越严重。

2 母线影响分析

高压变电站母线上连接着多种电器设备,经估算,500 kV变电站母线对地等值电容通常为 $6\ 000\ \text{pF} \sim 0.1\ \mu\text{F}^{[7]}$ 。如图2所示,当区外故障发生在 F_3 处时,保护测得的暂态电流将受到母线对地电容的影响。由于母线处为线路特性阻抗的不连续点,故障行波将在母线处发生透、反射。母线处透、反射系数的计算公式为:

$$H_B(s) = \frac{2(Z_1 // Z_C)}{Z_1 // Z_C + Z_3} \quad (8)$$

$$K_B(s) = \frac{(Z_1 // Z_C) - Z_3}{Z_1 // Z_C + Z_3} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9),可得母线透、反射系数的幅

频特性曲线,如附录A图A6所示。区外故障时,母线对暂态电流中高频分量有明显的衰减影响,且衰减效果随信号频率与母线等值电容的增加而更加显著。

通过比较UPFC和母线对地电容透射系数的幅频特性可得:区内故障时,暂态高频分量受到UPFC串联侧衰减影响,在一定条件下其高频含量会出现低于区外故障时的情况。这将使依赖于故障暂态高低频分量差异的单端暂态量保护灵敏性下降,后文对此进行了相应仿真分析。

在母线关联出线暂态电流频谱差异方面,根据上述关于母线等值电容的影响分析,可总结得出以下基本规律。

当输电线路发生故障时,无论线路上是否安装UPFC,考虑到母线对地电容的影响,同一母线上故障线路的高频含量将明显大于非故障线路;而非故障线路由于导线类型基本一致,其暂态电流中各频率含量分布接近相等。如附录A图A7所示,通过对母线关联全出线中暂态电流频谱差异 $f(\cdot)$ 的比较(即 $f(R_{M1}) > f(R_{M2}) \approx f(R_{M3})$, $f(R_{N1}) > f(R_{N2}) \approx f(R_{N3})$, $R_{M1}, R_{M2}, R_{M3}, R_{N1}, R_{N2}, R_{N3}$ 表示图A7中对应的保护装置),可有效识别线路故障方向,不受线路UPFC的衰减影响。

3 基于暂态频谱比较的方向纵联保护

3.1 保护算法

为减少行波传播过程中的色散效应,对各相电流 I_a, I_b, I_c 进行Karenbauer解耦变换,采用线模分量进行分析,即 $I_m = I_a + I_c - 2I_b$ 。考虑到母线电容的衰减作用,为准确提取信号突变处的能量变化,采样频率设为200 kHz,并选择分频能力较好的Db4小波基。对暂态信号进行4层离散小波分解,将低频分量记为第5层,分别表示为 D_1 至 D_5 ,其中第 j 层小波能量 E_j 计算为:

$$E_j(n\Delta T) = \sum_{k=n-M}^n |D_j(k\Delta T)|^2 \quad (10)$$

式中: ΔT 为采样周期; n 为第 n 个采样时刻; M 为采样窗长,设 $M = 200$,即数据窗长为1 ms; $D_j(k\Delta T)$ 为 k 时刻第 j 层小波分解系数。

将Shannon信息熵的概念与小波多尺度变换相结合,可利用小波能量熵提取暂态电流特征。小波能量熵是反映信号在全频域空间能量分布有序程度的一种量度,无须选取单一频带对高低频分量进行划分,具有较好的普适性。设 E 为各层小波能量之和,第 j 层尺度的小波能量占比设为 $p_j = E_j/E$,于是定义小波能量熵 $W_{ee}^{[25]}$ 如式(11)所示。

$$W_{ee} = - \sum_{j=1}^5 p_j \ln p_j \quad (11)$$

小波能量熵对信号总体幅值的敏感度较低。如附录A图A8所示,当线路正常时,电流主要含有基波及少数谐波,谱峰狭窄,因此熵值很低;当线路发生故障时,暂态电流含有丰富的成分,信号能量频谱较为平坦,因此熵值很高。随着采样窗口滑动,得到小波能量熵随时间的变化曲线。

3.2 保护方案

为准确获取故障暂态特征,采用暂态保护用电子式电流互感器,可准确跟踪信号幅值的突变^[26],表现为小波能量熵明显增大。设计保护启动判据如式(12)所示,保护启动定值 K_{set} 取为0.001。

$$K = \sum_{j=1}^{20} [W_{i,ee}(j\Delta T) - W_{i,ee}((j-M)\Delta T)] \geq K_{set} \quad (12)$$

式中: $W_{i,ee}$ 为第*i*台保护装置的小波能量熵。

随着智能变电站通信技术的不断发展,为站域信息的共享和交互提供了技术支持^[27],使本文所提保护方案的实现成为可能。以图3所示结构为例,网络层采用时延较低的光纤以太网,图中GOOSE为面向通用对象的变电站事件;SV为采样值。

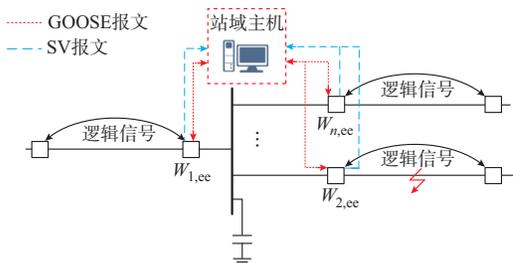


图3 各保护安装处的小波能量熵示意图
Fig.3 Schematic diagram of wavelet energy entropy at installation site of each protection

当母线各出线保护启动后,各保护计算1 ms内小波能量熵累加和 $\sum W_{i,ee}$,并将其上传SV网至站域主机。站域主机选取母线各出线中的最小值为基准值,计算各出线相对于基准值的比值 r_i 为:

$$r_i = \frac{\sum W_{i,ee}}{\min\{\sum W_{1,ee}, \sum W_{2,ee}, \dots, \sum W_{n,ee}\}} \quad (13)$$

式中: r_i 为第*i*条出线的比值。

经站域主机对各出线 r_i 与保护整定值 r_{set} 进行比较,识别故障方向,并通过GOOSE网向各出线保护发送动作信号。最终,各保护装置通过与对侧保护逻辑信号的综合判断,决定是否跳闸。

如附录A表A1所示,若母线各出线中存在 $r_i > r_{set}$ 时,对于 $r_i > r_{set}$ 的线路,判定该线路正方向发生

故障,线路本侧保护动作开放,并向对侧发送允许跳闸信号。对于 $1 \leq r_i < r_{set}$ 的线路,判定为线路反方向发生故障,闭锁本侧保护,并向对侧发送闭锁信号。若母线各出线均判定为 $1 \leq r_i < r_{set}$,当保护收到对侧允许跳闸信号时,判定为本侧母线发生故障。其中, r_{set} 值根据最不利的工况进行选取:①线路对侧母线发生故障时,保护应灵敏地识别故障,即线路 r_i 应明显大于 r_{set} ;②同一母线的线路出口发生故障时,非故障线路保护应可靠不误动,非故障线路 r_i 应明显小于 r_{set} 。根据仿真结果分析并考虑一定裕度,选取 $r_{set}=1.7$ 。

传统工频量保护所需数据窗长至少为10 ms,而所提暂态量保护仅需1 ms数据窗长,可与工频量保护在时间梯度上相互配合,提高保护性能。所提暂态量保护方案流程如图4所示,在与对侧保护纵联交互中,只需传输逻辑信号。当保护本侧动作开放,且接收到对侧允许跳闸信号时,保护出口动作。

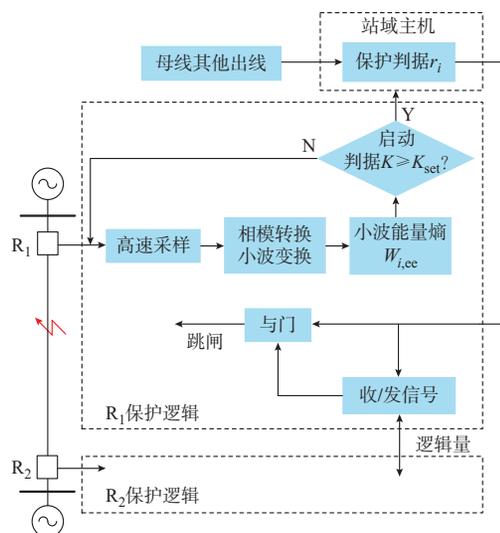


图4 保护方案流程图
Fig.4 Flow chart of protection scheme

4 仿真实验与分析

4.1 仿真模型

为验证本文所提保护方案的可靠性,利用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件搭建500 kV超高压输电系统,如图5所示。被保护线路MN长300 km,线路NJ长100 km,线路KM长100 km,线路PN长200 km,且线路两侧未装有阻波器。线路参数 $R_1=0.015\Omega/\text{km}$, $L_1=0.886\text{mH}/\text{km}$, $C_1=13.1\text{nF}/\text{km}$, $R_0=0.045\Omega/\text{km}$, $L_0=2.65\text{mH}/\text{km}$, $C_0=4.35\text{nF}/\text{km}$ 。为使仿真更具有普适性,设UPFC安装在线路MN中间。R1至R5为线路继电保护装置,母线对地电容为0.1 μF 。为验证保护的

可靠性,故障位置 F_1 至 F_5 分别设置为距母线 N 侧 250, 0, 150, 50, 10 km 处,其中 F_2 为母线故障。

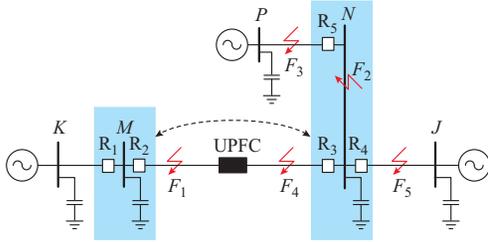


图5 500 kV 系统仿真模型
Fig.5 Simulation model of 500 kV system

4.2 不同故障位置及故障类型分析

如图5所示,分别设置区内故障发生在 F_1 和 F_4 , 区外故障发生在 F_2, F_3, F_5 。以故障初始角为 90° 的金属性短路为例,设置A相短路接地、AB两相短路接地、AB相间短路、ABC三相短路4种故障类型。图6为在不同位置发生A相接地故障时,各保护安装处小波能量熵随时间的变化曲线。

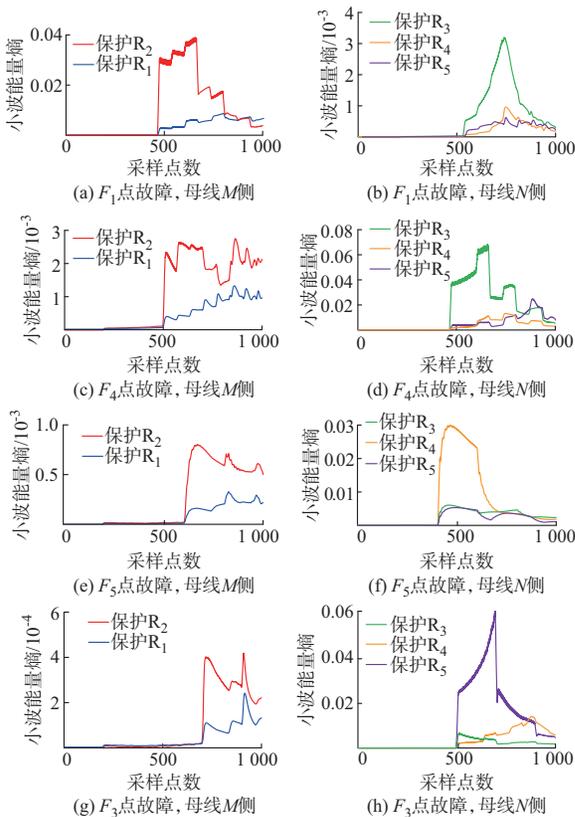


图6 不同故障位置单相接地短路的小波能量熵
Fig.6 Wavelet energy entropy of single-phase groundingshort circuit at different fault locations

由图6可知,当线路发生故障时,各保护安装处的小波能量熵均发生突变。以图6(b)和(f)为例可得,对于保护 R_3 , F_1 区内故障时的小波能量熵小于

F_5 区外故障时的小波能量熵,此时仅基于 R_3 单端信息无法识别故障。对比图6(a)和(c)可知,由于UPFC对暂态高频分量的衰减作用,使得小波能量熵降低。但在不同故障位置下,受到母线电容的影响,母线 M 与母线 N 故障侧线路的小波能量熵均明显大于非故障侧,且非故障侧线路的小波能量熵近似相等。表1详细给出了在不同故障位置及不同故障类型下,线路各保护安装处的保护判别值 r_i 。

表1 不同故障位置和故障类型下的小波能量熵比
Table 1 Ratio of wavelet energy entropy with different fault locations and fault types

故障位置	故障类型	M侧			N侧			方向
		小波能量熵比		方向	小波能量熵比			
		R_1	R_2		R_3	R_4	R_5	
F_1	AG	1	6.38	正向	4.92	1.00	1.14	正向
	ABG	1	6.25	正向	5.13	1.00	1.17	正向
	AB	1	6.29	正向	5.08	1.00	1.02	正向
	ABC	1	6.19	正向	5.20	1.07	1.00	正向
F_4	AG	1	3.75	正向	6.88	1.15	1.00	正向
	ABG	1	4.36	正向	6.32	1.00	1.22	正向
	AB	1	4.31	正向	6.36	1.00	1.11	正向
F_5	AG	1	3.31	正向	1.11	7.40	1.00	反向
	ABG	1	3.77	正向	1.07	6.60	1.00	反向
	AB	1	3.74	正向	1.00	6.62	1.04	反向
F_3	AG	1	3.43	正向	1.00	1.09	12.34	反向
	ABG	1	2.85	正向	1.00	1.03	9.42	反向
	AB	1	2.92	正向	1.07	1.00	9.06	反向
F_2	AG	1	3.02	正向	1.13	1.00	14.4	反向
	AG	1	3.57	正向	1.13	1.07	1.00	母线
	ABG	1	3.66	正向	1.12	1.01	1.00	母线
F_2	AB	1	3.74	正向	1.01	1.00	1.11	母线
	ABC	1	3.55	正向	1.10	1.09	1.00	母线

注:AG表示A相短路接地;ABG表示AB两相短路接地;AB表示AB相间短路;ABC表示三相短路。

由表1可知,在不同故障位置及不同故障类型下,母线故障侧与非故障侧线路的小波能量熵最小比值 r_i 为 2.85,保护可有效识别故障方向。在母线非故障侧线路中,保护安装处小波能量熵的最大比值 r_i 为 1.22,保护不会误动。对于同一故障,母线各出线测得暂态高频分量差异主要与母线对地电容有关,其小波能量熵之间的大小关系不会因故障位置而发生变化。在线路 MN 出口 1 km 处发生故障时,保护也能够可靠识别故障方向,见附录A表A2。当线路不含UPFC或UPFC退出运行时,母线故障侧

与非故障侧的小波能量熵差异同样明显,保护不受其影响。

4.3 不同过渡电阻分析

传统基于工频量的距离保护、电流保护均受过渡电阻的影响较大,因此需要分析不同过渡电阻对所提保护判据的影响。一般 500 kV 输电线路的最大过渡电阻约为 300 Ω ,因此设置单相接地故障的过渡电阻分别为 100, 200, 500 Ω 。

由附录 A 图 A9 和表 A3 可以看出,在不同故障位置和不同过渡电阻下,母线故障侧与非故障侧的小波能量熵差异依然较大,其比值基本不随过渡电阻发生变化,所提保护判据能有效识别故障方向。由于过渡电阻对故障暂态高频电流的幅值产生一定影响,进而使得小波能量熵减小,但母线各出线的测量值相对大小基本保持不变。因此,该保护判据基本不受过渡电阻的影响。

4.4 不同故障初始角分析

在不同故障初始角下,故障暂态高频分量的幅值将受到影响,因此设置故障初始角分别为 0°, 30°, 60°, 90°, 对保护判据的性能进行分析。

附录 A 图 A10 和表 A4 表明,在不同故障初始角和不同故障位置下,本文所提保护判据的灵敏度依然较高。随着故障初始角减小,暂态高频分量的幅值整体降低,从而使得小波能量熵减小。但由于母线电容的衰减影响,故障侧线路依然明显大于非故障侧线路。因此,所提保护判据在不同故障初始角下可以有效识别故障方向。

4.5 不同母线对地电容分析

由于本文所提保护原理是基于母线对地电容对暂态高频分量的影响,因此需要分析在不同母线电容下的保护判据性能。除前文所述的 0.1 μF 外,设置母线等值电容分别为 0.06, 0.02, 0.006 μF 。

由附录 A 表 A5 可得,随着母线对地电容的增大,母线故障侧与非故障侧的小波能量熵差异越明显,保护判据越灵敏。如附录 A 图 A11 所示,即使当母线电容为 0.006 μF 时, F_5 处发生故障,暂态高频分量经过母线电容与 UPFC 的双重衰减作用, M 侧母线小波能量熵的比值最小为 2.17,所提保护判据依然具有较高的灵敏度。因此,本文所提保护判据对母线等值电容的要求不高,具有较强的普适性。

4.6 典型单端暂态量保护分析

根据式 (10),以 E_1 和 E_2 分别作为高频和低频能量计算,其保护判据设计为 $R_{\text{atio}} = E_1/E_2^{[10]}$ 。以保护装置 R_3 为例,分析典型单端暂态量保护性能。数据窗长设为 1 ms,当分别发生区内故障 F_1 和区外故障 F_5 时,得到 R_3 保护判据值随时间变化的曲线。

由附录 A 图 A12 可知, F_1 区内故障时,由于线路 UPFC 串联侧的衰减作用,使得暂态电流高频能量 E_1 衰减较大,甚至出现保护判据值 R_{atio} 低于 F_5 区外故障的情况。此时,仅基于 R_3 信息的单端暂态量保护无法准确识别区内、外故障,使得保护灵敏性和可靠性下降。

相比于传统单端暂态量保护,所提保护方案需要一定的网络通信时间,但保护可靠性明显提升,且所提算法同样是基于小波变换得到,在计算速度上两者相差不大。相比于工频量保护,由于仅采用保护启动后 1 ms 的数据窗长,在速动性上依然具有较大优势。

5 结语

论文对母线关联出线的故障暂态特征及 UPFC 影响机理进行了分析,提出一种适用于含 UPFC 输电线路的暂态保护方案,经分析可得以下结论。

1) 含 UPFC 线路区内故障时,UPFC 串联侧将使暂态高频分量发生严重衰减,保护安装处的高频分量有可能低于区外故障,此时仅基于单端暂态量信息无法可靠识别故障方向。

2) 同一母线的出线中,故障线路的暂态电流由于未经母线对地电容的衰减作用,其保护测得的小波能量熵明显大于非故障线路,且非故障线路的小波能量熵基本相同。

3) 基于母线关联出线故障暂态信息的方向纵联保护方案,能有效识别含 UPFC 元件的输电线路区内、外及母线故障,可构成线路超高速保护,为暂态量保护的应用提供了一种新思路。

本文所提方法需要一定通信技术的支持,也需要从频带或幅值上躲过雷击等高频噪声的干扰影响。下一阶段将结合现场实际数据,对如何利用站域不同时间尺度下的故障暂态关联信息进一步探究,提升保护性能。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>), 扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

- [1] 陈刚,李鹏,袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127.
CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo. Application of MMC-UPFC on Nanjing western grid and its harmonic analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127.
- [2] 陈国平,王德林,裘榆涛,等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11.
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges

- and development prospects of relay protection technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11.
- [3] ALBASRI F A, SIDHU T S, VARMA R K. Performance comparison of distance protection schemes for shunt-FACTS compensated transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2116-2125.
- [4] 孔祥平,袁宇波,高磊,等.含UPFC线路的距离保护方案研究[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5219-5226.
KONG Xiangping, YUAN Yubo, GAO Lei, et al. Study of distance protection scheme for transmission line including UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5219-5226.
- [5] ZHOU X, WANG H, AGGARWAL R K, et al. Performance evaluation of a distance relay as applied to a transmission system with UPFC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1137-1147.
- [6] 李仲青,曹虹,张和,等.500 kV UPFC对工频变化量方向保护的影响分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(22):55-63.
LI Zhongqing, CAO Hong, ZHANG He, et al. Analysis of the impact of 500 kV UPFC on impedance directional protection based on variation [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 55-63.
- [7] 段建东,张保会,任晋峰,等.超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J].中国电机工程学报,2007,27(1):37-43.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, REN Jinfeng, et al. Single-ended transient-based protection for EHV transmission lines basic theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43.
- [8] 张保会,哈恒旭,吕志来.利用单端暂态量实现超高压输电线路全线速动保护新原理研究(一)——故障暂态过程分析及实现单端暂态量保护的可行性[J].电力自动化设备,2001,21(6):1-5.
ZHANG Baohui, HA Hengxu, LÜ Zhilai. Study of non-unit transient-based whole-line high speed protection for EHV transmission line: Part 1 fault transient analysis and the feasibility of non-unit transient protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(6): 1-5.
- [9] 马静,徐岩,王增平.利用数学形态学提取暂态量的变压器保护新原理[J].中国电机工程学报,2006,26(6):19-23.
MA Jing, XU Yan, WANG Zengping. Power transformer protection based on transient data using mathematical morphology [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 19-23.
- [10] 张保会,哈恒旭,吕志来.利用单端暂态量实现超高压输电线路全线速动保护新原理的研究(二)——保护判据的研究[J].电力自动化设备,2001,21(7):1-6.
ZHANG Baohui, HA Hengxu, LÜ Zhilai. Study of non-unit transient-based whole-line high speed protection for EHV transmission line: Part 2 protection criteria [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(7): 1-6.
- [11] 刘青,王增平,郑振华.小波奇异熵在线路暂态保护和全线相继速动保护中的应用[J].电力系统自动化,2009,33(22):79-83.
LIU Qing, WANG Zengping, ZHENG Zhenhua. Application of wavelet singular entropy theory in transient protection and accelerated trip of transmission line protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 79-83.
- [12] 郭振威,姚建刚,康童,等.一种输电线路超高速方向保护方法[J].电工技术学报,2016,31(22):168-177.
GUO Zhenwei, YAO Jiangan, KANG Tong, et al. A method for directional ultra-high-speed protection of transmission lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 168-177.
- [13] 李泽文,贺子凝,郭田田,等.基于时频矩阵相似度的输电线路暂态保护方法[J].电力系统自动化,2019,43(5):121-134. DOI:10.7500/AEPS20180806002.
LI Zewen, HE Zining, GUO Tiantian, et al. Transient protection method for transmission lines based on similarity of time-frequency matrix [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 121-134. DOI: 10.7500/AEPS 20180806002.
- [14] 董新洲,雷傲宇,汤兰西,等.行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J].电力系统自动化,2018,42(19):184-191. DOI:10.7500/AEPS20171116010.
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi, et al. Analysis of travelling wave characteristics and challenges and prospects of travelling wave differential protection technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 184-191. DOI: 10.7500/AEPS20171116010.
- [15] 邹贵彬,高厚磊,江世芳,等.新型暂态行波幅值比较式超高速方向保护[J].中国电机工程学报,2009,29(7):84-90.
ZOU Guibin, GAO Houlei, JIANG Shifang, et al. Novel transient travelling wave based amplitude comparison ultra high speed directional protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 84-90.
- [16] 邓丰,李欣然,曾祥君,等.基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1475-1487.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.
- [17] 胡巨,杨明玉.基于小波包变换的暂态保护在带TCSC输电线路中的应用[J].电工技术学报,2004,19(12):83-85.
HU Ju, YANG Mingyu. Transient protection of TCSC transmission line based on wavelet packet transform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 83-85.
- [18] 万雄彪.含FACTS元件输电线路暂态量保护研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.
WAN Xiongbiao. Study on transient protection of transmission lines containing FACTS components [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [19] 刘青,王增平,郑振华,等.基于信号复杂度的串补线路单端暂态保护[J].中国电机工程学报,2010,30(13):81-88.
LIU Qing, WANG Zengping, ZHENG Zhenhua, et al. Non-unit transient protection based on signal complexity for series compensated transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 81-88.
- [20] 刘青,常彦彦.SSC串补线路两端暂态保护的研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(2):82-87.
LIU Qing, CHANG Yanyan. Research on two-end transient

- protection principle for series compensated transmission lines with SSSC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 82-87.
- [21] 陈福锋,钱国明,宋国兵. 串联电容补偿线路行波差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 89-94.
CHEN Fufeng, QIAN Guoming, SONG Guobing. Study on traveling-wave differential protection for series compensated line [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 89-94.
- [22] 罗澍忻,董新洲,施慎行,等. 极化电流行波方向继电器在串补线路中的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 100-105.
LUO Shuxin, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Application of polarized current travelling wave based direction relay in series compensated transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 100-105.
- [23] 商立群,夏远洋. 基于能量比函数的串补线路行波故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5228-5234.
SHANG Liqun, XIA Yuanyang. Energy ratio function-based traveling wave fault location for series compensated line [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5228-5234.
- [24] 贾科,宣振文,李晨曦,等. 柔性直流配网中基于暂态高频阻抗比较的方向纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5343-5351.
JIA Ke, XUAN Zhenwen, LI Chenxi, et al. A directional pilot protection based on phase angle of transient high-frequency impedance for flexible DC distribution grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5343-5351.
- [25] 何正友. 小波分析在电力系统暂态信号处理中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
HE Zhengyou. Application of wavelet analysis in power system transient signal processing [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [26] 杨忠州,冯建华,谢婷婷,等. 不同原理的保护用电流互感器暂态特性对比分析[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 234-240.
YANG Zhongzhou, FENG Jianhua, XIE Tingting, et al. Comparative analysis on transient characteristics of protective current transformers with different principles [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 234-240.
- [27] 李志坚,潘书燕,宋斌,等. 智能变电站站域保护控制装置的研发[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 107-113.
LI Zhijian, PAN Shuyan, SONG Bin, et al. Development of substation-area protection and control device in smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 107-113.

吕哲(1994—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统保护与控制。E-mail:lvzhee@126.com

王增平(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动控制、变电站综合自动化。E-mail:wangzp1103@sina.com

许琬昱(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统保护与控制。E-mail:xuwanyuu@163.com

Pilot Protection of UPFC Line Based on Transient Spectrum Information of Busbar-connected Outgoing Lines

LYU Zhe, WANG Zengping, XU Wanyu, LIANG Jiadi

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: With the gradual application of unified power flow controller (UPFC) as new generation components of flexible AC transmission systems in transmission lines, it is necessary to study the protection principle of the line with UPFC in deep. By analyzing the transient influence of UPFC on fault line, it is concluded that the series side of UPFC has a serious attenuation effect on the high frequency components, and the reliability of single-end transient protection is reduced. The analysis of the fault transient characteristics of busbar-connected outgoing lines shows that there is a significant difference in the current spectrum distribution between the fault side line and the non-fault side lines for the same busbar. By using the wavelet energy entropy to extract the transient information of each outgoing line of the busbar, a directional pilot protection scheme for the line with UPFC is proposed. The simulation results show that the scheme can accurately identify the internal faults, external faults and bus faults. The scheme also has good sensitivity and reliability under fault conditions such as different transition resistances and fault inception angles.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900604) and National Natural Science Foundation of China (No. 51637005).

Key words: fault transient component; unified power flow controller (UPFC); busbar outgoing line; transmission line protection; wavelet energy entropy

