

考虑串补电容的超高压输电 线路暂态保护判据研究

宋丽群,徐 波,韩 笑

(南京工程学院 电力工程系,江苏 南京 210013)

摘要:超高压输电线路发生故障时,线路上的串补电容及其保护回路都将在故障时产生附加的暂态分量,利用同一时间段内不同频率分量的衰减程度不同区分区内、区外故障或利用高频暂态量电流信号奇异点(突变点)的奇异性区分区内、区外故障的单端暂态量保护判据,并不适用于带有串联补偿电容的输电线路。给出了一种适用于带有串补电容的输电线路暂态保护新判据,并通过理论分析及算例仿真,证明了其可行性。

关键词:超高压;串补电容;单端暂态量保护;保护判据

中图分类号:TM 711

文献标识码:A

文章编号:1006-6047(2005)01-0037-03

0 引言

“通过检测故障暂态产生的高频信号实现传输线及电力设备等的保护”是新一代电力系统继电保护思想,简称“暂态保护”(transient based protection)^[1]。故障暂态产生的信号中含有大量的信息,其中包括故障的类型、方向、位置、持续时间等。在故障发生瞬间,由于母线处以及故障点的阻抗与波阻抗不同,因此会在两端母线产生波的折射和反射。对于暂态电流而言,这些折射、反射使得暂态电流在不同时刻包含不同强度和衰减常数的频率成分。区内故障时,电流高频分量由于输电线路的分布参数特性而衰减较少,因此在一个时间段内的高频与低频分量的能量差异不大。当区外故障时由于母线杂散电容以及阻波器、结合电容等的影响,使得暂态电流在一个时间段内较高频分量的能量远低于较低频分量的能量。

根据这一特点,运用小波变换可调的柔性时频窗,对高频、低频信号分别采取可变的尺度进行分析,提出了一种基于小波框架理论的新型暂态量保护原理:即利用暂态电流的能量突变检测故障发生作为保护的启动元件;利用一个时间段内不同频率分量的衰减程度作为区分区内和区外故障的主判据;利用一个时间段内不同频率分量的衰减程度作为区分区内和区外故障的主判据;利用暂态电流信号奇异点(突变点)的奇异性不同作为区分区内、区外故障的辅助判据^[2,3]。此判据对于无串补电容的输电线路故障而言是可行的,而对于有串补电容的线路,当区外故障时,则有可能出现电流高频频谱能量经母线杂散电容耗散后仍大于在区内故障时所产生的

的频谱能量,保护可能误动。针对这种情况,本文根据任一频率的故障分量由故障点传输到保护安装处时间不变,即保护所感受到的高频分量模极大值出现的时刻不因串补电容存在而改变这种特点^[4],提出一种新型的保护判据,以期解决这一难题。

1 考虑串补电容的保护判据

新型保护判据的设计思路是:对于某一固定频率的滤波器而言,先根据线路长度,计算出(或通过试验得出)线路末端故障时,高频分量模极大值产生的时间 $t_{\max}$,并根据此时间,对高频分量及次高频分量,分别以不同的数据窗计算能量,高频分量的时间窗取值等于或略大于 $t_{\max}$,次高频分量时间窗可取 $(2\sim 3)t_{\max}$ (如此选择主要考虑到保护的速动性),利用区内故障时,在 $t_{\max}$ 时间段内,有高频能量的模极大值出现;而区外故障时,在 $t_{\max}$ 时间段内无高频能量模极大值出现这一特点,对原主、辅判据进行改进。

1.1 保护主判据

电流高频分量通过小波变换后,可得到不同尺度 j 上的小波变换系数,某一固定时间窗内的小波变换系数的平方和表征了某一频带暂态电流在窗内的能量。在实际的应用中电流选用模量电流 $I_m(I_m = I_A + I_B - 2I_C; I_A, I_B, I_C$ 为 A, B, C 相电流采样值)更能适应故障类型的任意性。设小波变换后在 2^{j_1} 和 2^{j_2} 上的能量为 S_{j_1} 和 S_{j_2} ,改进后的主判据为

$$S_{j_1}(n_1 \Delta T_1) = \sum_1^{n_1} |W I_{m1}(j_1, n_1 \Delta T_1)|^2 \Delta T_1 \quad (1)$$

$$S_{j_2}(n_2 \Delta T_2) = \sum_2^{n_2} |W I_{m2}(j_2, n_2 \Delta T_2)|^2 \Delta T_2$$

$$R = \frac{S_{j_1}(n_1 \Delta T_1)}{S_{j_2}(n_2 \Delta T_2)} k k \quad (2)$$

式中 $k k$ 为尺度因子,这里取为 300; I_{m1}, I_{m2} 为不同

采样频率下的模电流采样序列; n_1, n_2 为 I_{m1}, I_{m2} 小波变换时间窗的窗口采样数; $\Delta T_1, \Delta T_2$ 分别为计算 I_{m1}, I_{m2} 的采样间隔; j_1, j_2 为小波变换选择的不同尺度。

取 $j_2 > j_1$, 即 S_{j_1} 为尺度 j_1 上的高频成分, S_{j_2} 为尺度 j_2 上的低频成分, 调整衰减系数 k , 可通过式 (2) 所得 R 的大小判别区内和区外故障。由前面分析可知, 若为区内故障, R 较大; 而区外故障, R 则较小。如果以区外故障时最大的 R 值作为整定依据, 则可较方便地给出 R 的整定值, 考虑到暂态量保护尚处于理论研究阶段, 故未给出定值。

1.2 保护辅助判据

区内故障时, 第一个行波浪涌到达母线时, 保护安装处测量到的故障暂态电流信号呈现阶跃性质, 暂态电流信号在该时刻存在奇异性, 在该点的小波变换各个尺度下的值近似相等。而区外故障时, 随着尺度的增大, 第一个行波浪涌所对应奇异点的小波变换值也越大, 新型判据的分子、分母所对应的窗口采样数并不相同, 改进后的辅助判据为

$$R_1 = \max \left[\frac{\max_{n_1} \{ |\langle h_{j_1, n_1}, I_{m1} \rangle| \}}{\max_{n_2} \{ |\langle h_{j_2, n_2}, I_{m2} \rangle| \}} \right] > R_{set} \quad (3)$$

式中 R_1 为模极大值比率; R_{set} 为模极大值比率的整定值; n_1, n_2 为 I_{m1}, I_{m2} 小波变换时间窗的窗口采样数, 取值同式 (1)。

同样, 取 $j_2 > j_1$, 可通过 R_1 的大小判别区内和区外故障。区内故障时, R_1 较大; 区外故障时, R_1 较小。考虑到暂态量保护尚处于理论研究阶段, 故未给出定值。

2 仿真分析

仿真模型如图 1 所示。图中 K_1 点代表 M 母线出口处故障; K_2 点代表距 M 母线 133 km 处 (线路中段) 故障; K_3 点代表串补电容线路侧故障; K_4 点代表

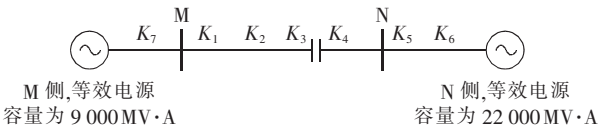


图 1 故障点定义

Fig.1 Definitions of fault points

串补电容母线侧故障; K_5 点代表 N 母线上故障; K_6 点代表距 N 母线 100 km 处故障; K_7 点代表 M 母线背后故障。仿真时, 选取采样频率为 $f_s = 200$ kHz, 存储流过母线 M 侧保护安装处故障电流采样值, 通过计算得到模量电流 I_m , 然后编制小波变换计算程序对 I_m 进行小波分析。小波基选用 5 系数 Dabuechies 小波, 它具有正交、紧支以及高阶消失矩, 滤波效果较好。选取尺度 1 上的高频波及尺度 5 上的高频波进行分析计算, 原因是尺度 1 上的高频波含有的高频成分最为丰富, 而尺度 5 上的高频波较好地拟合了次高频故障电流分量。

经初步计算可知, 在 MN 线路及 N 母线侧末端故障时, 无论是串补电容前还是串补电容后故障, 高频分量模极大值出现时刻都为故障后 0.9 ms, 即 $t_{max} = 0.9$ ms。分别模拟电压过零及电压为幅值时 $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7$ 各点的单相接地、两相短路、三相短路故障。通过编制程序计算新判据所对应的能量比率 (放大 106 倍) 及基于模极大值理论的模极大值比率, 以及高频分量模极大值出现的时刻 t_{mh} 。结果如表 1 及表 2 所示。

由表 1、表 2 分析可得以下 2 点结论:

a. 采用该种计算方式进行计算时, 能够较明显地区分出故障点是否在整定范围以内, 即对于模极大值高频分量出现在 0.9 ms 以后的故障, 其 R 及 R_1 都较小, 且比值差距十分显著;

b. 对于某些故障类型, 保护区末端 (K_4) 与相邻线路出口 (K_5) 故障相比, R 及 R_1 值相对变化并不明显, 但都能满足区内故障时 R 及 R_1 值较区外的大。

表 1 电压过 90° 时故障的小波变换分析结果 (保护判据考虑串补电容)

Tab.1 The wavelet transform results when phase of voltage is 90° (with consideration of series capacitor compensation)

参 数	故 障 点						
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
R (单相接地 A 相)	225.430 0	114.250 0	16.930 0	86.980 0	62.340 0	0.001 6	228.560 0
R (两相短路 BC 相)	329.990 0	105.560 0	41.380 0	57.580 0	44.810 0	0.000 5	183.360 0
R (三相短路)	350.150 0	102.070 0	41.380 0	43.610 0	36.140 0	0.000 1	136.520 0
R_1 (单相接地 A 相)	253.760 0	237.370 0	63.830 0	301.580 0	252.510 0	0.993 6	221.340 0
R_1 (两相短路 BC 相)	325.570 0	229.450 0	188.700 0	226.180 0	194.450 0	0.560 4	200.490 0
R_1 (三相短路)	320.310 0	239.860 0	188.750 0	192.120 0	169.580 0	0.234 0	173.930 0
t_{mh} (单相接地 A 相)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.001 2	0.000 0
t_{mh} (两相短路 BC 相)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.001 2	0.000 0
t_{mh} (三相短路)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.001 2	0.000 0

注: 计算起始时间为故障前 1 ms, 终止时间为故障后 2 ms, 时间窗口 3 ms, 采用 db5, 分析到第 5 层, 能量比值计算时间为故障后 0.92/2 ms, t_{mh} 单位为 s; 表 2 同。

表 2 电压过 0° 时故障的小波变换分析结果 (保护判据考虑串补电容)
Tab.2 The wavelet transform results when phase of voltage is 0°
(with consideration of series capacitor compensation)

参 数	故 障 点						
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
R (单相接地 A 相)	245.792 2	127.580 1	89.172 0	96.738 1	29.923 2	0.001 4	230.024 3
R (两相短路 BC 相)	350.810 0	96.730 0	59.250 0	36.010 8	30.745 3	0.000 2	134.130 0
R (三相短路)	342.650 0	96.260 0	36.270 0	36.030 0	29.920 0	0.000 4	136.530 0
R_1 (单相接地 A 相)	226.163 9	206.738 3	304.568 2	274.920 0	161.230 0	83.118 2	262.918 2
R_1 (两相短路 BC 相)	673.340 0	335.630 0	362.040 0	251.260 0	229.540 0	81.740 0	173.660 0
R_1 (三相短路)	620.780 0	333.930 0	258.830 0	258.480 0	233.320 0	79.970 0	173.930 0
t_{nh} (单相接地 A 相)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.001 2	0.000 0
t_{nh} (两相短路 BC 相)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.001 2	0.000 0
t_{nh} (三相短路)	0.000 0	0.000 5	0.000 9	0.000 9	0.000 9	0.001 2	0.000 0

3 结语

- a. 新的保护判据充分考虑了高频分量模极大值的出现时刻不受串补电容影响及线路末端故障时,高频分量模极大值产生的时刻 t_{max} 值相对稳定的特点,对文献[1]提出的暂态保护判据进行了探索性改进,并通过仿真证明了该保护判据能正确区分带串补电容输电线路的区内、区外故障。
- b. 原判据只以同一时间段的能量比及模极大值比值决定保护是否动作,而新判据对于高频分量及次高频分量,分别以不同的数据窗计算能量,使高频能量在很大程度上受到模极大值出现时刻 t_{max} 的限制,而次高频能量受限制程度较小,从而使暂态保护范围与 t_{max} 的关系更为紧密。
- c. 能量比值的计算时间范围大小将决定保护范围的大小。对于单端量保护而言,要实现全线速动,必须对时间 t_{max} 进行非常精确的计算。

参考文献:

[1] BO Z Q. A new non-communication protection technique for transmission lines [J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1998, 13(4): 1073–1078.

[2] 何正友,王晓茹,钱清泉. 利用小波分析实现 EHV 输电线路单端量暂态保护的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(10): 10–14, 19.

HE Zheng-you, WANG Xiao-ru, QIAN Qing-quan. A study of EHV transmission lines non-unit transient protection based on wavelet analysis [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(10): 10–14, 19.

[3] 哈恒旭,张保会,吕志来,等. 超高压输电线路新型单端超高速保护研究[J]. *电力自动化设备*, 2001, 21(4): 6–9.

HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, LÜ Zhi-lai, et al. A novel ultra-high speed non-unit protection for EHV transmission line [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2001, 21(4): 6–9.

[4] 韩 笑,宋丽群,李先允. 串补电容对电流暂态量的影响分析[J]. *南京工程学院学报(自然科学版)*, 2003, 1(4): 64–67.

HAN Xiao, SONG Li-qun, LI Xian-yun. Analysis of series capacitor compensation affecting faults current's high frequency transient component [J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2003, 1(4): 64–67.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

宋丽群(1967–),女,黑龙江哈尔滨人,讲师,硕士,从事电力系统继电保护及变电站综合自动化的教学与研究工作;
徐 波(1971–),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子及传动;
韩 笑(1969–),男,江苏扬州人,讲师,硕士,从事电力系统继电保护、电力系统仿真的教学与研究工作。

Research of protection criterion for EHV transmission line with compensating series capacitor
SONG Li-qun, XU Bo, HAN Xiao

(Dept. of Electric Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: When fault occurs on EHV(Extra High Voltage) transmission lines, the compensating series capacitor and its protective circuit on the lines will cause additional transient components. The non-unit transient-based protection criterion, which uses the energy descent rates of different frequencies during a certain period or the Lipschitz degree at singularity point to distinguish internal and external faults, is inapplicable to EHV transmission line with compensating series capacitors. Thus a new transient-based protection criterion for EHV transmission lines with compensating series capacitors is provided. The theoretic analysis and simulative results show that the proposed method is feasible.

Key words: EHV; compensating series capacitor; non-unit transient protection; protection criterion