

输电线路突变量电流差动继电器

柳焕章¹, 周泽昕², 周春霞², 杜丁香², 王兴国²

(1. 华中电网有限公司, 湖北省 武汉市 430077; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Current Differential Relay of Transmission Lines Based on Incremental Quantity

LIU Huanzhang¹, ZHOU Zexin², ZHOU Chunxia², DU Dingxiang², WANG Xingguo²

(1. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430077, Hubei Province, China.

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: For improving the performance of current differential relay based on incremental quantity for transmission lines, a new protection scheme was proposed. It contains four parts: current differential relay, insensitive current differential relay, sensitive current differential relay and zero sequence current differential relay that are based on incremental quantity. Incremental quantity recursive algorithm was used to compute incremental quantity to accelerate the speed of protection. Sensitive coefficient was introduced to the restraint quantities in order to revise the operation characteristic in real time, and thus improve the reliability of the protection in the case of external short-circuit faults and the sensitivity of the protection in the case of internal short-circuit faults. For weak-feed transmission lines, an impedance differential relay based on incremental quantity was designed to open the current differential relay based on incremental quantity. The four incremental quantity based relays form a good inverse time characteristic in operation time. Results of dynamic simulation proved that the proposed scheme can operate quickly, and its performance is hardly influenced by voltage transformer (VT) breaking and fault resistances.

KEY WORDS: transmission lines; incremental quantity; current differential relay; impedance differential relay; incremental quantity recursive algorithm; adaptive brake current algorithm

摘要: 为提高突变量差动保护的性能, 提出了全新的突变量差动保护方案, 包括纯电流突变量差动继电器、不灵敏电流突变量差动继电器、灵敏电流突变量差动继电器和突变量零序电流差动继电器。该保护方案中利用递推傅里叶算法计算突变量, 随故障后数据窗的移动自适应修改动作特性, 提高继电器的动作速度; 在制动量中引入灵敏系数, 实时修正动作特性, 提高区外短路时保护的可靠性和区内故障时的灵敏度; 针对弱馈线路, 设计了一种突变量差动阻抗继电器来开放突变量电流差动继电器。方案中的4个突变量继电器, 在动作时间上形成了良好的反时限特性。动模试验结果表明本方案动作迅速, 不受电压互感器(voltage transformer, VT)

断线影响, 且耐过渡电阻能力强。

关键词: 输电线路; 突变量; 电流差动继电器; 阻抗差动继电器; 递推算法; 自适应制动算法

0 引言

电流差动保护由于原理简单、工作可靠且具有良好的选择性, 长期以来其原理研究及应用受到了保护工作者的极大关注, 但是电流差动保护也有一些需要解决的问题, 如其性能会受到电流互感器(current transformer, CT)饱和、变压器的励磁涌流、线路差动的电容电流等因素的影响^[1-10]。

作为线路主保护的差动保护必须有选择性地快速切除故障, 研究人员通常将注意力集中在被保护对象(线路)上, 即研究如何精确快速补偿线路的电容电流^[11-14], 这种思路和方法在工程应用中取得了较为满意的效果。对于线路的电容电流目前常规的做法是进行补偿, 这种思想受限于孤立地研究输电线路。线路是系统的组成部分, 若孤立地研究线路, 则可用资源仅限于线路; 若结合系统研究线路, 则资源就丰富得多。本文的目的不是要精确补偿线路的电容电流, 而是区分差动电流是被保护线路短路引起的, 还是线路电容电流引起的。

本文提出了一系列新原理、新方法, 构造了全新的线路突变量电流差动继电器方案。提出了一种突变量差动阻抗继电器, 其原理是: 短路点突变量电压/短路点突变量电流=系统综合阻抗; 电容器突变量电压/流经电容器的突变量电流=电容器容抗。区内短路的突变量差动电流=短路点突变量电流; 区外短路的突变量差动电流=线路电容突变量电流。因此, 保护安装处的突变量电压/突变量差动电流, 在区内短路时反映系统综合阻抗; 区外短路时

反映线路容抗，两者的量级相差很大。

本文所提方案还采用一系列新方法，包括突变量递推算法、新型比幅式动作特性和制动量自适应算法。突变量递推算法可以解决继电器动作速度与数据窗长度之间的矛盾，在制动量中引入制动系数，实时修正动作特性，满足突变量继电器快速动作要求。突变量差动继电器由 4 部分组成，分别是纯电流突变量差动继电器、不灵敏电流突变量差动继电器、灵敏电流突变量差动继电器和突变量零序电流差动继电器，它们形成了很好的反时限特性。动模试验结果验证了本方案的快速性和可靠性。

1 突变量递归算法

故障初始，故障后数据入窗，窗内包含故障前、后数据，这样跨窗计算的相量是不准确的。于是人们寻求短窗算法，以提高继电器的动作速度，如半波积分或半波傅氏算法等。通常认为：短数据窗提高保护动作速度，长数据窗保证计算精度。对于比幅式继电器，倘若固定采用长窗算法，如全波傅氏算法，即使是跨窗计算，如果计算的突变量电流幅值单调增，且不大于最终满窗的突变量电流幅值，那么，就可以通过修改继电器的动作特性提高动作速度，达到满窗保证精度。保护动作定值随时间变化的关系如图 1 所示，图中 T 为一周波(20 ms)。

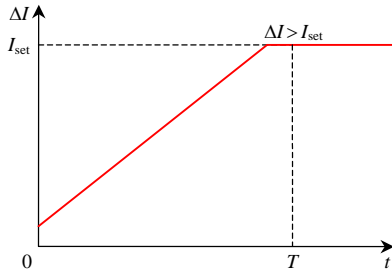


图 1 动作定值与时间关系

Fig. 1 Curve of I_{set} versus t

一个以 T 为周期的函数 $f_T(t)$ (如电网中的电压、电流)，若在 $[-T, 0]$ 上满足狄氏条件，那么，在 $[-T, 0]$ 上就可以展成傅氏级数。

在计算电网中的电压、电流的基波时，存在 2 种算法：一种随截取不同时刻的窗(积分区间)得到不同的初相角；另一种维持初相角不变。

例如， $[t_{k-1}-T, t_{k-1}]$ 的基波值：

$$\begin{cases} a_{k-1} = \frac{2}{T} \int_{t_{k-1}-T}^{t_{k-1}} f_T(t) \cos(\omega t) dt \\ b_{k-1} = \frac{2}{T} \int_{t_{k-1}-T}^{t_{k-1}} f_T(t) \sin(\omega t) dt \end{cases} \quad (1)$$

计算 $[t_{k-1}-T, t_k]$ 的基波值，有 2 种算法：

1) 第 1 种算法。

$$\begin{cases} a_k = \frac{2}{T} \int_{t_{k-1}-T}^{t_k} f_T(t+T_s) \cos(\omega t) dt \\ b_k = \frac{2}{T} \int_{t_{k-1}-T}^{t_k} f_T(t+T_s) \sin(\omega t) dt \end{cases} \quad (2)$$

式(2)可以变换为

$$\begin{cases} a_k = \frac{2}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} f_T(t) \cos(\omega t - \varphi_s) dt \\ b_k = \frac{2}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} f_T(t) \sin(\omega t - \varphi_s) dt \end{cases} \quad (3)$$

2) 第 2 种算法。

$$\begin{cases} a_k = \frac{2}{T} \int_{t_{k-1}-T}^{t_{k-1}} f_T(t+T_s) \cos \omega(t+T_s) dt \\ b_k = \frac{2}{T} \int_{t_{k-1}-T}^{t_{k-1}} f_T(t+T_s) \sin \omega(t+T_s) dt \end{cases} \quad (4)$$

式(4)可以变换为

$$\begin{cases} a_k = \frac{2}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} f_T(t) \cos(\omega t) dt \\ b_k = \frac{2}{T} \int_{t_k-T}^{t_k} f_T(t) \sin(\omega t) dt \\ c_k = \frac{1}{\sqrt{2}} a_k + j \frac{1}{\sqrt{2}} b_k \end{cases} \quad (5)$$

比较式(2)与式(4)，初相角差 $\varphi_s = \omega T_s = \omega(t_k - t_{k-1})$ 。这是由于被分解函数 $f_T(t)$ 与相关函数 $\cos(\omega t)$ 、 $\sin(\omega t)$ 的时间差引起的。被分解函数 $f_T(t)$ 后移 T_s ，而相关函数 $\cos(\omega t)$ 、 $\sin(\omega t)$ 未移。若相关函数同步后移 T_s ，就消除了初相角差 φ_s 。

电网的应用中并不关心相量的绝对初相角，只关心它们之间的相对相角(相位差)。因此，同时刻的相量运算，只要截取相同的窗，采用相同的算法，则得到的相位差是正确的。但是，不同时刻的相量运算，也必须坚持正确的相角关系。第 1 种算法的窗只能相差 nT ，而第 2 种算法无此要求。例如计算突变量，第 1 种算法故障前窗超前故障后窗 nT 且随故障后窗同步推移。第 2 种算法固定故障前窗且靠近故障时刻，故障后窗随时间推移。直观上式(4)比式(2)简单、规整。例如采用第 2 种算法计算，则有

$$\begin{cases} a_k - a_{k-1} = \frac{2}{T} \int_{t_{k-1}}^{t_k} [f_T(t) - f_T(t-T)] \cos(\omega t) dt \\ b_k - b_{k-1} = \frac{2}{T} \int_{t_{k-1}}^{t_k} [f_T(t) - f_T(t-T)] \sin(\omega t) dt \end{cases} \quad (6)$$

若采用第 1 种算法计算就相对复杂。

将式(6)离散得递推公式：

$$\begin{cases} a_k = a_{k-1} + \frac{2}{N}[f_T(t_k) - f_T(t_{k-N})]\cos\frac{2k\pi}{N} \\ b_k = b_{k-1} + \frac{2}{N}[f_T(t_k) - f_T(t_{k-N})]\sin\frac{2k\pi}{N} \end{cases} \quad (7)$$

应用式(7)计算突变量,期望记忆的故障前量(a_0, b_0)尽可能靠近故障时刻。将式(7)两边同减 a_0, b_0 ^[15]。得突变量递推公式

$$\begin{cases} \Delta a_{k-0} = \Delta a_{(k-1)-0} + \frac{2}{N}[f_T(t_k) - f_T(t_{k-N})]\cos\frac{2k\pi}{N} \\ \Delta b_{k-0} = \Delta b_{(k-1)-0} + \frac{2}{N}[f_T(t_k) - f_T(t_{k-N})]\sin\frac{2k\pi}{N} \end{cases} \quad (8)$$

设 $k=0$ 发生故障,显见,初值为0。 $k=1$ 为故障后第一点。

采用递推的傅里叶算法计算突变量的优势在于:在相量形成的过程中,随时间推移逐渐逼近满窗,计算结果逐渐准确,动作特性的裕度也随之逐渐减小,直至为0。

2 突变量电流差动继电器

突变量电流差动继电器的基本要求:强电源提供的穿越性区外短路可靠不动作,任何区内短路可靠动作。这是一个不高的要求且容易做到。

突变量差动继电器原理分为相量部分和采样值部分2部分。

突变量电流差动继电器用相量表示的动作方程为^[16-17]:

$$|\Delta \dot{I}_\Sigma| > K |0.35\Delta \dot{I}_m - \Delta \dot{I}_n| \quad (9)$$

式中: $\Delta \dot{I}_m$ 和 $\Delta \dot{I}_n$ 为线路的两侧突变量电流, $|\Delta \dot{I}_m| \geq |\Delta \dot{I}_n|$, $|\Delta \dot{I}_\Sigma| = |\Delta \dot{I}_m + \Delta \dot{I}_n|$; K 为制动系数。

突变量电流差动继电器用采样值表示的动作方程为

$$|\Delta i_\Sigma(t_k)| > K |\Delta i_R(t_k)| \quad (10)$$

式中: $\Delta i_\Sigma(t_k)$ 为突变量采样值差动电流, $\Delta i_\Sigma(t_k) = \Delta i_m(t_k) + \Delta i_n(t_k)$, $\Delta i_m(t_k)$ 和 $\Delta i_n(t_k)$ 为线路两侧的突变量电流采样值; $i_R(t_k)$ 为突变量采样值制动电流, $\Delta i_R(t_k) = 0.35\Delta i_m(t_k) - \Delta i_n(t_k)$ 。

对于突变量差动电流 $\Delta i_\Sigma(t_k)$,结合式(8),可得:

$$\begin{cases} \Delta a_{k-0} = \Delta a_{(k-1)-0} + \frac{2}{N}[(i_m(t_k) - i_m(t_{k-N})) + (i_n(t_k) - i_n(t_{k-N}))]\cos\frac{2k\pi}{N} \\ \Delta b_{k-0} = \Delta b_{(k-1)-0} + \frac{2}{N}[(i_m(t_k) - i_m(t_{k-N})) + (i_n(t_k) - i_n(t_{k-N}))]\sin\frac{2k\pi}{N} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $i_m(t_k)$ 、 $i_n(t_k)$ 分别为线路两侧电流采样值。

对于突变量制动电流 $\Delta i_R(t_k)$,为了提高内部故障的灵敏度,在 $\Delta i_R(t_k)$ 递推公式中引入灵敏系数 ρ 。

令 $\eta = \Delta i_m(t_k)\Delta i_n(t_k)$,线路区内外短路时, η 满足如下关系:

对于强电源提供的穿越性区外短路电流, $\eta < 0$;

对于弱电源提供的穿越性区外短路电流, $\eta \approx 0$;

对于双侧强电源区内短路电流, $\eta > 0$;

对于强/弱电源区内短路电流, $\eta \approx 0$ 。

因此,利用 η 调节差动继电器的制动电流。

当 $\eta > -10 \text{ kA}$ 时,令 $\rho = 0$;当 $\eta \leq -10 \text{ kA}$ 时,令 $\rho = 1$ 。即对于每一个采样点,只要 $\eta > -10 \text{ kA}$,该采样点只参与差动,不参与制动,这样就可以大大提高突变量电流差动继电器的制动系数 K (如 $K=2$)。

这样,强电源提供的穿越性区外短路,基本上点点参与制动,加上极高的制动系数,差动继电器可靠不动作。

结合式(8),若 m 侧乘以0.35,则 $\Delta i_R(t_k)$ 的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta a_{k-0m} = \Delta a_{(k-1)-0m} + \rho \frac{2}{N}[0.35(i_m(t_k) - i_m(t_{k-N})) - (i_n(t_k) - i_n(t_{k-N}))]\cos\frac{2k\pi}{N} \\ \Delta b_{k-0m} = \Delta b_{(k-1)-0m} + \rho \frac{2}{N}[0.35(i_m(t_k) - i_m(t_{k-N})) - (i_n(t_k) - i_n(t_{k-N}))]\sin\frac{2k\pi}{N} \\ \Delta c_{k-0m} = \frac{1}{\sqrt{2}}\Delta a_{k-0m} + j\frac{1}{\sqrt{2}}\Delta b_{k-0m} \end{cases} \quad (12)$$

若 n 侧乘以0.35,则 $\Delta i_R(t_k)$ 的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta a_{k-0n} = \Delta a_{(k-1)-0n} + \rho \frac{2}{N}[(i_m(t_k) - i_m(t_{k-N})) - 0.35(i_n(t_k) - i_n(t_{k-N}))]\cos\frac{2k\pi}{N} \\ \Delta b_{k-0n} = \Delta b_{(k-1)-0n} + \rho \frac{2}{N}[(i_m(t_k) - i_m(t_{k-N})) - 0.35(i_n(t_k) - i_n(t_{k-N}))]\sin\frac{2k\pi}{N} \\ \Delta c_{k-0n} = \frac{1}{\sqrt{2}}\Delta a_{k-0n} + j\frac{1}{\sqrt{2}}\Delta b_{k-0n} \end{cases} \quad (13)$$

$$|\Delta i_R(t_k)| = \min\{|\Delta c_{k-0m}|, |\Delta c_{k-0n}|\}$$

需要特别指出,突变量电流差动继电器投入0~40 ms,计算 $\eta = \Delta i_m(t_k)\Delta i_n(t_k)$ 时, Δ =故障后-故

障前，因此，故障前一周波的数据重复使用 2 次。

3 突变量差动阻抗继电器

弱电源提供的穿越性区外短路，电源弱到一定程度时多数的点不参与制动，极高的制动系数抵挡不了被削弱的制动电流，突变量电流差动继电器会误动作；另外，单电源突然施加电压，电容充电或突然失去电压而电容放电时，突变量电流差动继电器立即误动作。因此，本文提出了一种突变量差动阻抗继电器来开放突变量电流差动继电器。

弱电源线路强电源侧区外短路时，线路沿线电压基本相等：

$$\begin{cases} \Delta \dot{U} \approx \Delta \dot{U}_C \\ |\Delta \dot{I}_\Sigma Z_C| \approx |\Delta \dot{U}_C| \end{cases} \quad (14)$$

式中： $\Delta \dot{U}$ 为保护安装处突变量电压相量； $\Delta \dot{U}_C$ 为线路分布电容的电压降； Z_C 为线路分布电容的容抗。

区内短路时，由于 $|Z_\Sigma| \ll |Z_C|$ ，所以有

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_\Sigma Z_\Sigma| \approx |\Delta \dot{U}_F| \\ |\Delta \dot{I}_\Sigma Z_C| \geq |\Delta \dot{U}_F| \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\Delta \dot{U}_F$ 为故障点处的突变量电压； Z_Σ 为系统综合阻抗。

突变量差动阻抗继电器动作方程为

$$|\Delta \dot{I}_\Sigma Z_{\text{set}}| > K |\Delta \dot{U}| \quad (16)$$

式中 K 的取值为 5~8。

对于无并联电抗器的线路 $Z_{\text{set}} = Z_C$ ，对于有并联电抗器的线路 $Z_{\text{set}} = \lambda Z_L // Z_C$ 。

$$Z_{\text{set}} = \frac{\lambda Z_L Z_C}{\lambda Z_L + Z_C} = \frac{(Z_L - 0.2 Z_C) Z_C}{Z_L + 0.8 Z_C} \quad (17)$$

式中 $\lambda = 1 + 0.2 |Z_C| / |Z_L| = 1 - 0.2 Z_C / Z_L$ 。

用采样值表示 $\Delta \dot{U}$ 为 $\Delta u(t_k)$ ，结合式(8)， $\Delta u(t_k)$ 的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta a_{k-0} = \Delta a_{(k-1)-0} + \frac{2}{N} (u(t_k) - u(t_{k-N})) \cos \frac{2k\pi}{N} \\ \Delta b_{k-0} = \Delta b_{(k-1)-0} + \frac{2}{N} (u(t_k) - u(t_{k-N})) \sin \frac{2k\pi}{N} \end{cases} \quad (18)$$

对于式(16)，采样值电流和电压不做差分，直接递推，递推时间为 0~40 ms。

电压互感器(voltage transformer, VT)安装位置及 VT 断线会影响 $|\Delta \dot{U}|$ ，母线 VT 能正确反映系统综合阻抗，线路 VT 能正确反映线路容抗。当装置

接收到手合开入，采用母线 VT 时，令 $|\Delta \dot{U}| = 0.8 \text{ pu}$ ，线路 VT 不做任何处理。VT 断线时，令 $|\Delta \dot{U}| = 0.8 \text{ pu}$ 。

4 实施方案

本线路突变量电流差动继电器由纯电流突变量差动继电器、不灵敏电流突变量差动继电器、灵敏电流突变量差动继电器和零序差动继电器 4 部分组成。

1) 纯电流突变量差动继电器。

纯电流突变量差动继电器动作方程为

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_\Sigma| > f(t) I_{\text{set}} \\ |\Delta \dot{I}_\Sigma| > 2 |0.35 \Delta \dot{I}_m - \Delta \dot{I}_n| \end{cases} \quad (19)$$

式中 $f(t)$ 和 I_{set} 的定义分别如图 2、3 所示。

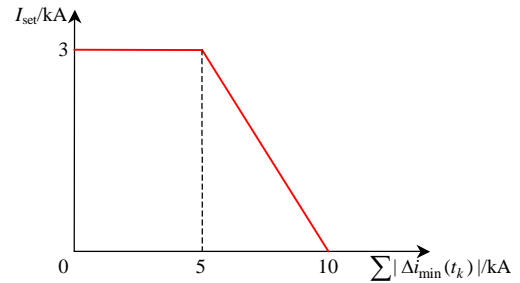


图 2 I_{set} 曲线

Fig. 2 Curve of I_{set}

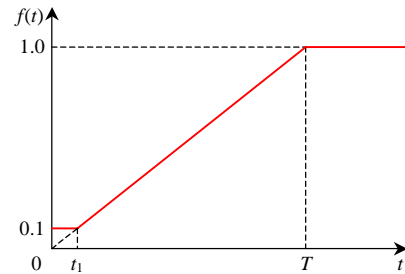


图 3 $f(t)$ 曲线

Fig. 3 Curve of $f(t)$

$$I_{\text{set}} = \begin{cases} 3 \text{ kA}, & 0 < \sum |\Delta i_{\min}(t_k)| < 5 \text{ kA} \\ -0.6 \sum |\Delta i_{\min}(t_k)| + 6, & 5 \text{ kA} < \sum |\Delta i_{\min}(t_k)| < 10 \text{ kA} \\ 0, & \sum |\Delta i_{\min}(t_k)| > 10 \text{ kA} \end{cases}$$

比较每一个突变量采样值电流绝对值大小，确定较小者，对其积分求取 $\sum |\Delta i_{\min}(t_k)|$ ，用以判别单侧电源还是双侧电源。

$$f(t) = \begin{cases} 0.1, & t < t_1 \\ \frac{1}{T}, & t_1 < t < T \\ 1, & t > T \end{cases}$$

当其连续 3 点大于整定值时动作, 正常情况下投入 20 ms, VT 断线时投入 40 ms。

2) 不灵敏电流突变量差动继电器。

不灵敏相差动继电器动作方程为

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{\Sigma}| > 800 \text{ A} \\ |\Delta \dot{I}_{\Sigma}| > 1.8 |0.35 \Delta \dot{I}_m - \Delta \dot{I}_n| \\ |\Delta \dot{I}_{\Sigma} Z_{\text{set}}| > 8 |\Delta \dot{U}| \end{cases} \quad (20)$$

Z_{set} 按正序阻抗整定, 且 $Z_{\text{set}} \geq 2 \text{ k}\Omega$, 若计算定值小于 $2 \text{ k}\Omega$, 取 $Z_{\text{set}} = 2 \text{ k}\Omega$ 。

当其连续 6 点大于整定值时动作, 投入 0~40 ms。

3) 灵敏电流突变量差动继电器。

灵敏相差动继电器动作方程为

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{\Sigma}| > 500 \text{ A} \\ |\Delta \dot{I}_{\Sigma}| > 1.5 |0.35 \Delta \dot{I}_m - \Delta \dot{I}_n| \\ |\Delta \dot{I}_{\Sigma} Z_{\text{set}}| > 5 |\Delta \dot{U}| \end{cases} \quad (21)$$

Z_{set} 按正序阻抗整定, 且 $Z_{\text{set}} \geq 2 \text{ k}\Omega$, 若计算定值小于 $2 \text{ k}\Omega$, 取 $Z_{\text{set}} = 2 \text{ k}\Omega$ 。

当其连续 24 点大于整定值时动作, 投入 0~40 ms。

4) 突变量零序差动继电器。

对于零序差动继电器, 其性能更好, 因为零序电容比正序电容小, 且零序分量本身就是突变量。对于突变量零序差动继电器, 需要先提取零序分量。

$$3i_0(t) = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t)$$

突变量零序差动继电器的动作方程为

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{0\Sigma}| > 500 \text{ A} \\ |\Delta \dot{I}_{0\Sigma}| > 1.5 |0.35 \Delta \dot{I}_{m0} - \Delta \dot{I}_{n0}| \\ |\Delta \dot{I}_{0\Sigma} Z_{\text{set}}| > 5 |\Delta \dot{U}_0| \end{cases} \quad (22)$$

Z_{set} 按零序阻抗整定, 且 $Z_{\text{set}} \geq 2 \text{ k}\Omega$, 若计算定值小于 $2 \text{ k}\Omega$, 取 $Z_{\text{set}} = 2 \text{ k}\Omega$ 。

当其连续 24 点大于整定值时动作, 投入 0~40 ms。

VT 位置对突变量零序差动继电器没有影响。

VT 断线时, 令 $|\Delta \dot{U}| = 0.8 \text{ pu}$ 。

本方案具有动作快速, 灵敏度高的特点, 受 CT 饱和影响较小。

5 动模验证

为了验证本文所提方案的有效性, 在动模试验系统搭建了 1000 kV 串补线路模型(如图 4 所示)。

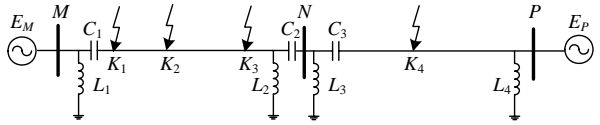


图 4 动模试验系统

Fig. 4 Dynamic simulation system

系统原型参数如下: 电压等级 1000 kV, 线路 MN 长度为 363 km, 线路 NP 长度为 291 km, 线路正序电阻为 9.39 mΩ/km, 正序电抗为 270.2 mΩ/km, 正序电容为 13.79 nF/km, 零序电阻为 175.70 mΩ/km, 零序电抗为 780.4 mΩ/km, 零序电容为 8.66 nF/km。串补 C₁ 和 C₂ 的补偿度为线路 MN 全长的 20%, 串补 C₃ 的补偿度为线路 NP 全长的 40%。M 侧系统的正序电阻为 4.34 Ω, 正序电抗为 74.7 Ω, P 侧系统的正序电阻为 4.57 Ω, 正序电抗为 69.4 Ω, 并联电抗器 L₁—L₄ 的容量分别为 960、720、720 和 600 Mvar。K₁—K₄ 分别位于线路 MN 的始端、中点、末端及线路 NP 中点, 保护安装在线路 MN 的两端。试验考虑了不同过渡电阻、不同故障位置、不同故障类型、转换性故障、振荡中故障、VT 断线、CT 断线及手合于故障等因素。

K₃ 点发生 AB 相金属性短路时, 线路两侧继电器的动作时间如表 1 所示。

表 1 K₃ 点 AB 故障时保护动作时间

Tab. 1 Operation time of protections for an A-B-short fault at K₃

继电器类型	动作时间/ms	
	M 侧	N 侧
纯电流突变量差动继电器	6	4
不灵敏电流突变量差动继电器	9	6
灵敏电流突变量差动继电器	24	21

振荡中 K₁ 点发生 A 相金属性接地时, 线路两侧继电器的动作时间如表 2 所示。

表 2 振荡中 K₁ 点发生 B 相接地故障时的保护动作时间

Tab. 2 Operation time of protections for a B-to-ground fault at K₁ during swing

继电器类型	动作时间/ms	
	M 侧	N 侧
纯电流突变量差动继电器	7	4
不灵敏电流突变量差动继电器	10	6
灵敏电流突变量差动继电器	25	21
突变量零序差动继电器	25	22

K₂ 点发生 A 相经 400 Ω 过渡电阻接地时, 线路两侧继电器的动作时间如表 3 所示。

结合表 1—3 可以看出, 区内故障(包括 400 Ω

表 3 K_2 点 A 相经 $400\ \Omega$ 电阻接地时的保护动作时间

Tab. 3 Operation time of protections for an A-to-ground fault with $400\ \Omega$ fault resistance at K_2

继电器类型	动作时间/ms	
	M 侧	N 侧
纯电流突变量差动继电器	15	15
不灵敏电流突变量差动继电器	17	16
灵敏电流突变量差动继电器	30	29
突变量零序差动继电器	31	30

高阻接地故障)时,本文提出的突变量差动继电器可以快速准确动作。

N 侧 VT 的 A 相断线后, K_3 点发生 A 相接地故障时,线路两侧继电器的动作时间如表 4 所示。从中可得 VT 断线后,本文提出的突变量差动继电器也可以快速准确动作。

表 4 VT 断线 K_3 点 A 相金属性接地时保护动作时间

Tab. 4 Operation time of protections for an A-to-ground at K_3 during VT broken

继电器类型	动作时间/ms	
	M 侧	N 侧
纯电流突变量差动继电器	5	6
不灵敏电流突变量差动继电器	7	8
灵敏电流突变量差动继电器	22	23
突变量零序差动继电器	23	24

K_4 点发生 A 相接地故障(区外故障)时,本文提出的突变量差动继电器不动作。

动模试验验证了本文所提方案的快速性,各种故障情况下,各类故障继电器动作正确,严重故障时动作速度极快,最快不足 5 ms。4 个继电器组合而成,形成理想的反时限特性。由于原理上与过渡电阻无关,因此切除高阻故障的动作时间完全取决于整定的电流定值,其可耐受的故障过渡电阻远高于规定值。

6 结论

本文提出了一套完整的线路突变量差动继电器方案,具有以下特点:

- 1) 该方案包括纯电流突变量差动继电器、不灵敏电流突变量差动继电器、灵敏电流突变量差动继电器和零序差动继电器 4 部分,具有很好的反时限特性。
- 2) 利用傅里叶递推算法计算突变量可解决继电器动作速度与数据窗长度之间的矛盾。
- 3) 在制动量中引入灵敏系数,实时修正动作特性,强电源提供的穿越性区外短路可靠不动作,

区内短路时灵敏度高。

4) 提出了一种突变量差动阻抗继电器来开放突变量电流差动继电器,可以防止弱电源线路故障时突变量电流继电器误动。

5) 由于该方案原理上与过渡电阻无关,不受 VT 断线影响,耐过渡电阻能力强,严重故障动作速度极快,最快不足 5 ms。

参考文献

[1] 杨经超,尹项根,陈德树,等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 71-77. Yang Jingchao, Yin Xianggen, Chen Deshu, et al. Study on the operation characteristi of sampled value differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 71-77(in Chinese).

[2] 袁荣湘,陈德树,张哲. 高压输电线路新型差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 9-13. Yuan Rongxiang, Chen Deshu, Zhang Zhe. Study on a new differential protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 9-13(in Chinese).

[3] 高厚磊,江世芳,贺家李. 输电线路新型电流差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 49-53. Gao Houlei, Jiang Shifang, He Jiali. Study on new type of current differential protection for transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 49-53(in Chinese).

[4] 尹项根,郇能灵,杨书富. 标积制动量的应用与分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 85-88. Yin Xianggen, Tai Nengling, Yang Shufu. The application and analysis of the differential protection with the product-restraint quantity[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 85-88(in Chinese).

[5] 林湘宁,何战虎,刘世明,等. 复式电流比例差动保护判据的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 98-102. Lin Xiangning, He Zhanhu, Liu Shiming, et al. Reliability evaluations on complex current percentage differential criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 98-102(in Chinese).

[6] 李晓华,张哲,尹项根,等. 故障分量比率差动保护整定值的选取[J]. 电网技术[J]. 2001, 25(4): 47-50. Li Xiaohua, Zhang Zhe, Yin Xianggen, et al. Selection of settings of differential protection based on fault component[J]. Power System Technology, 2001, 25(4): 47-50(in Chinese).

[7] 林湘宁,刘沛. 全电流与故障分量电流比例差动判据的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 27-31. Lin Xiangning, Liu Pei. Comparative studies on percentage differential criteria using phase current and superimposed pahse current[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2004, 24(10): 27-31(in Chinese).
- [8] 葛耀中. 电流差动保护动作判据的分析与研究[J]. 西安交通大学学报, 1980, 14(2): 1-10.
- Ge Yaozhong. Analysis and study of the criteria of current differential protection[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1980, 14(2): 1-10(in Chinese).
- [9] 袁荣湘, 陈德树, 马天皓, 等. 基于相关分析的暂态电流差动保护的原理与性能研究[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 40-42.
- Yuan Rongxiang, Chen Deshu, Ma Tianhao, et al. Study on transient current differential protection based on correlation analysis[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 40-42(in Chinese).
- [10] 索南加乐, 刘凯, 阿里木江·卡德尔. 消除相间电容电流影响的故障分量综合阻抗计算方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 67-71.
- Suonan Jiale, Liu Kai, Alimujiang Kader. An improved method for calculating fault component integrated impedance to eliminate the influence of phase-to-phase capacitance current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 67-71(in Chinese).
- [11] 索南加乐, 张怿宁, 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 compensating algorithm on Π -model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18(in Chinese).
- [12] 毕天妹, 于艳莉, 黄少锋. 超高压线路差动保护电容电流的精确补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 30-34.
- Bi Tianshu, Yu Yanli, Huang Shaofeng. Novel accurate compensation method of capacitance current of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 30-34(in Chinese).
- [13] 索南加乐, 杨钺, 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(in Chinese).
- [14] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 适用于特高压线路的差动保护分布电容电流补偿算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 36-40.
- Su Bin, Dong Xinzhou, Sun Yuanzhang. Distributed capacitive current compensation algorithm for current differential relay of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 36-40(in Chinese).
- [15] 柳焕章, 贾晓辉. 自适应突变量继电器及其傅里叶算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 31(20): 74-77.
- Liu Huanzhang, Jia Xiaohui. Adaptive variation relay and its fourier algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 31(20): 74-77(in Chinese).
- [16] 李晓华, 柳焕章, 尹项根, 等. 新型双 K 值差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 49-55.
- Li Xiaohua, Liu Huanzhang, Yin Xianggen, et al. Novel differential protection with double restraint coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 49-55(in Chinese).
- [17] 柳焕章, 李晓华. 新型数字线路电流差动保护原理及其应用[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 74-81.
- Liu Huanzhang, Li Xiaohua. A novel principle of digital current differential protection for transmission line and its application[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 74-81(in Chinese).



柳焕章

收稿日期: 2012-04-26。

作者简介:

柳焕章(1954), 男, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护运行管理、整定计算、继电保护原理研究;

周泽昕(1969), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护原理及测试、电力系统动态模拟技术;

周春霞(1965), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护原理及测试、电力系统动态模拟技术;

杜丁香(1977), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护原理及测试、电力系统动态模拟技术;

王兴国(1981), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护原理及测试, wangxingguo@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 刘浩芳)