

单相重合闸自适应零序电流加速保护方案

杨涛, 何奔腾, 黄瀛

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 研究了单相重合闸过程中暂态零序电流的特征及其对傅氏算法和傅氏加差分算法的影响。通过理论分析和仿真计算发现暂态零序电流主要由非周期分量和高频分量组成, 对于傅氏算法非周期分量的影响占主导地位, 而对于傅氏加差分算法, 高频分量的影响较大。根据暂态零序电流的特征, 提出了单相重合时自适应零序电流加速保护的方案, 解决了常规方案需要延时的缺陷。

关键词: 单相重合闸; 暂态零序电流; 自适应加速保护

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4897(2004)13-5059-04

0 引言

电力系统的运行经验表明, 自动重合闸可以自动恢复瞬时故障线路的运行, 保证系统稳定, 所以在电力系统中获得了广泛的应用。按照重合方式, 重合闸分为三相重合闸和单相重合闸。在短路故障中, 单相接地故障占绝大多数, 因此单相重合闸应用十分广泛。

在电力系统中, 重合闸与继电保护的关系极为密切, 自动重合闸装置应在重合闸前或重合闸后加速继电保护的動作, 对于阶段式保护, 加速保护可以提高合闸于故障线路时的動作速度。在高压输电线路中, 通常采用纵联方向和距离保护实现全线速动。但在重合闸时, 合闸环流会引起纵联方向保护的误动, 并且若是合闸于振荡线路, 距离保护也会误动, 所以通常在合闸期间闭锁纵联方向保护, 而通过加速距离保护或零序电流保护的后备段来快速切除故障。对于三相重合闸, 在严重故障时通常可以由距离保护加速段来快速切除故障, 对于高阻接地故障, 当距离保护的灵敏度不够时由零序电流保护加速段切除故障。由于要考虑断路器三相触头不同时闭合所引起的零序电流, 零序电流保护的加速段一般延时 100 ms 动作。单相重合闸时不存在断路器三相不同时闭合所引起的零序电流, 但由于合闸环流存在暂态过程, 所以会产生暂态零序电流, 而为了提高合闸于永久性故障时保护的動作速度和灵敏度, 在单相重合闸时常采用加速零序电流三段或四段的方案, 故加速段的動作电流比较小, 从而可能造成加速段保护的误动作。所以单相重合闸时的零序电流保护加速段也需要延时, 数字式保护中通常延时 60 ms。单相重合闸都是不检同期的, 合闸时系统有可

能已经发生非全相振荡, 所以通常不设距离保护加速段, 近似配置距离加速段保护也需要振荡闭锁环节, 故在严重故障时也需要利用零序电流保护延时 60 ms 来切除故障, 这就给系统安全稳定运行带来非常不利的影響。因此, 提高单相重合于故障线路时保护的動作速度具有重要意义。

1 暂态零序电流的特征

长距离输电线路的参数是分布参数, 所以合闸时的暂态电流中有无穷多高频分量, 但是频率越高幅值越小也越容易滤除。这里只是定性分析合闸过程中零序电流的暂态过程并研究各个分量的变化规律, 为便于分析, 采用一个 T 型网络的集中参数模型来计算合闸时的暂态过程。

分析所采用的系统模型如图 1(a) 所示, 在 S 侧开关的 A 相单相重合闸。

利用拉氏变换在频域计算电路的暂态过程。为使运算等效电路的起始条件为零, 可以采用叠加原理。由叠加原理可知, 合闸过程相当于两种状态的叠加^[1]: 一是合闸前的状态, 即非全相运行状态, 其零序网络如图 1(b) 所示; 一是合闸后的附加状态, 附加状态是无源网络, 在合闸处接入一个与合闸前的断口电压大小相等但方向相反的电动势。此时的附加状态网络是不对称的, 仍可以利用对称分量法计算其暂态过程^[2], 得到附加状态零序网络如图 1(c) 所示。所以暂态零序电流有两部分组成: 一是图 1(b) 所示非全相运行时稳态零序电流 $i_{01}(t)$; 一是图 1(c) 所示附加状态的零序电流 $i_{02}(t)$, 则暂态零序电流

$$i_0(t) = i_{01}(t) + i_{02}(t) \quad (1)$$

设合闸前断口电压为 $u_s(t) = U \sin(\omega t + \varphi)$,

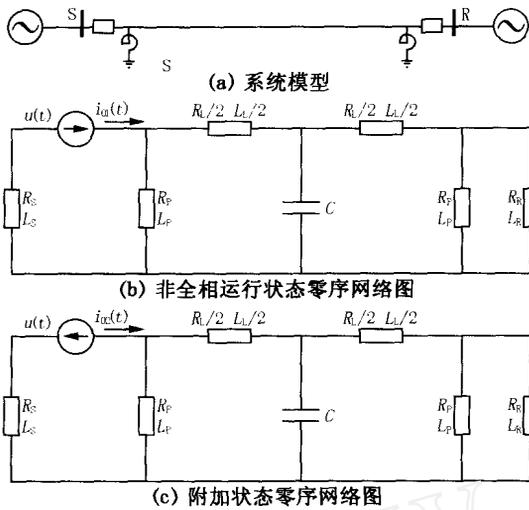


图1 暂态过程计算模型

Fig. 1 Model of system transient process calculation

为合闸角,则 $u(t) = u_s(t)/3$,其拉普拉斯变换为

$$U(s) = \frac{U[\sin(\theta)s + \theta_0 \cos \theta]}{3(s^2 + \omega_0^2)} \quad (2)$$

图1(b)和图1(c)的网络完全相同,设 $G(s)$ 为网络运算导纳,并注意到图1(b)为稳态网络,所以有

$$i_{01}(t) = L^{-1}[G(j\omega_0)U(s)] \quad (3)$$

$$i_{02}(t) = L^{-1}[-G(s)U(s)] \quad (4)$$

其中: $L^{-1}()$ 为拉普拉斯变反变换的符号。

对于稳态网络,线路并联电抗、分布电容以及电阻分量都可以忽略,故有

$$G(j\omega_0) = \frac{1}{j\omega_0(L_S + L_L + L_R)} \quad (5)$$

将式(2)~式(4)代入式(1)得

$$i_0(t) = I_{01}L^{-1} \left\{ [G(j\omega_0) - G(s)] \frac{\sin(\theta)s + \theta_0 \cos \theta}{|G(j\omega_0)| (s^2 + \omega_0^2)} \right\} \quad (6)$$

其中: I_{01} 为非全相运行时零序电流的幅值。

考虑到电阻比电抗小得多,为了得到暂态零序电流的解析表达式,在计算各分量的频率和幅值时,忽略电阻的影响,把电路作为纯电感网络来计算;而在计算各个分量的衰减常数时,再计及电阻的影响,并且假设系统与线路的阻抗角相等。以合闸前非全相运行时零序电流的幅值 I_{01} 作为基值,求式(6)暂态零序电流的标么值为:

$$i_0(t) = \frac{-\cos \theta}{|G(j\omega_0)| L \omega_0} e^{-\frac{t}{T_0}} - \frac{L - L'}{|G(j\omega_0)|^2 L L'} \sqrt{(\frac{\omega_0^2 - \omega_0'^2}{2}) \sin^2 \theta + \frac{\omega_0'^2}{2} \sin(\theta - \theta')} e^{\frac{t}{T_2}} \quad (7)$$

式(7)表明,暂态零序电流由衰减的非周期分量和高频谐波分量组成,其中: T_0 、 T_2 分别为非周期分量和高频分量衰减时间常数,其值为 $T_2 = 2 T_0 = \frac{2L_L}{R_L}$; ω_0' 为高频分量角频率,

$$= \sqrt{\frac{1}{N C [(L_L/2 + L_P // L_S) // (L_L/2 + L_P // L_R)]}}$$

由于线路并联电抗比系统电抗大得多,即 $L_P \gg L_R$,

$$L_S, \text{ 故 } \sqrt{\frac{1}{N C [(L_L/2 + L_S) // (L_L/2 + L_R)]}}$$

L_L 、 L 为纯电感零序网络等效电抗,同样由于线路并联电抗远大于系统和线路电抗,近似值为 $L_S + L_L + L_R$ 和 $L_S + \frac{L_L}{2}$;

为高频分量初相角, $\theta' = \arctan(\frac{\omega_0'}{\omega_0} \cot \theta)$ 。

将式(5)代入式(7)后得

$$i_0(t) = -\cos \theta e^{-\frac{t}{T_0}} - \frac{(L - L') \omega_0^2}{L^2} \sqrt{(\frac{\omega_0^2 - \omega_0'^2}{2} - 1) \sin^2 \theta + 1} \sin(\theta - \theta') e^{\frac{t}{T_2}} \quad (8)$$

式(8)是在线路简化模型下得到的,与仿真计算比较,结果基本一致,只是高频分量的频率和幅值存在一定的误差,但其变化规律是一样的,可以用作定性分析。图2为500 kV、400 km 线路在不同合闸角情况下的暂态零序电流波形,其中图2(a)线路具有并联电抗器,图2(b)则不带并联电抗器。可以看到并联电抗器的存在与否对暂态零序电流的影响很小。由式(8)可以得出暂态零序电流的一些特点:

1) 暂态零序电流主要由衰减的非周期分量和衰减的高频分量组成。非周期分量是由于系统中电感电流不能突变引起的,而高频分量是输电线路分布电容产生的。并联电抗器的存在与否对非周期分量和高频分量的影响很小。

2) 合闸角度 θ 会显著影响各分量的幅值,但不会影响各分量的频率和衰减时间常数。当 $\theta = 0$ 合闸时,非周期分量最大,高频分量很小;而 $\theta = 90$ 合闸时高频分量最大,非周期分量为零。

3) 高频分量的幅值小于非周期分量,但衰减比较慢。随着线路长度的增加,高频分量的频率降低,幅值增大;非周期分量与线路长度无关。

2 暂态零序电流的大小

在数字式保护中广泛采用傅氏算法来计算电流的大小。由于傅氏算法滤除衰减非周期分量能力较

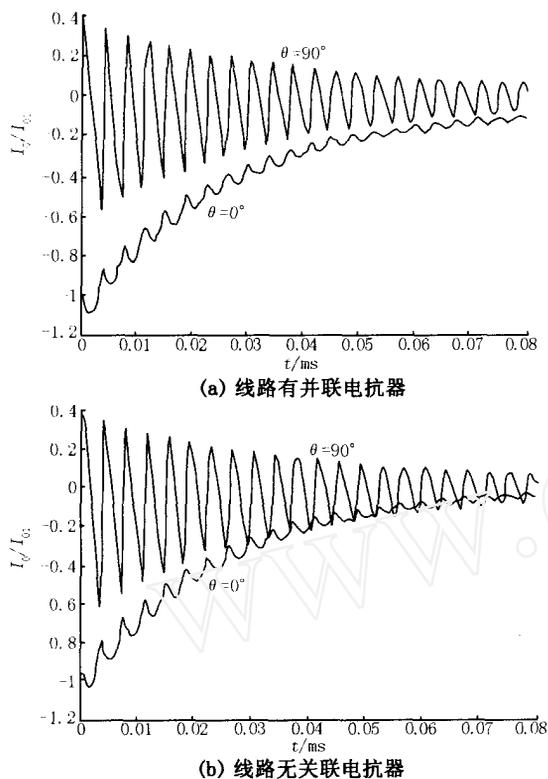


图2 暂态零序电流波形

Fig. 2 Waveform of transient zero-sequence current

弱,常常在算法前先对电流瞬时值进行差分运算。图3(a)和图3(b)分别表示500 kV、400 km线路在 $\theta = 90^\circ$ 和 0° 合闸时暂态零序电流经过傅氏算法和傅氏算法带一阶差分后的计算结果。由于暂态零序电流主要由非周期分量和某个谐波分量构成,在 $\theta = 90^\circ$ 时谐波分量最大,而在 $\theta = 0^\circ$ 时非周期分量最大,所以其它合闸角度时的暂态零序电流大小应该介于这两种合闸角度之间。下面结合图3(a)和图3(b)讨论暂态零序电流大小的特点:

对于傅氏算法,由非周期分量引起的暂态零序电流占主要成分,高次谐波的影响很小,所以应该主要考虑非周期分量的影响。非周期分量的影响与线路长度的关系比较固定,只要已知系统运行参数就可以比较容易地估计出非周期分量的最大值。高次谐波的大小是随线路长度增加而增大的。随着线路长度的增加,高频分量的幅值增大,频率减小,而傅氏算法随着频率的减小其旁瓣增大,从而使高频分量的影响变大。线路比较短时,高次谐波实际上很小;即便对于比较长的线路(例如400 km),其影响也不大。

对于傅氏带差分的算法,由于差分后进一步抑制了非周期分量,但放大了高频分量,所以高频分量

成为暂态零序电流大小的主导作用。对于长度小于200 km的中短线路,高频分量很小,差分环节可以有效地消除非周期分量的影响,傅氏带差分算法的滤波性能要优于傅氏算法;而对于较长的线路,高频分量增大,加之高频分量的衰减也比较慢,傅氏带差分算法的滤波性能比傅氏算法差。

为了得到不同线路长度情况下最大的暂态零序电流的数值,对500 kV的各种系统进行了仿真计算,结果为:中短线路(< 200 km),傅氏算法为0.166,傅氏带差分算法为0.103;长线(200~400 km),傅氏算法为0.191,傅氏带差分算法为0.22。非全相振荡情况下,合闸前零序电流幅值是变化的,但以合闸前一个周波内的数据计算所得幅值作为基值,暂态零序电流的大小仍有以上结果。

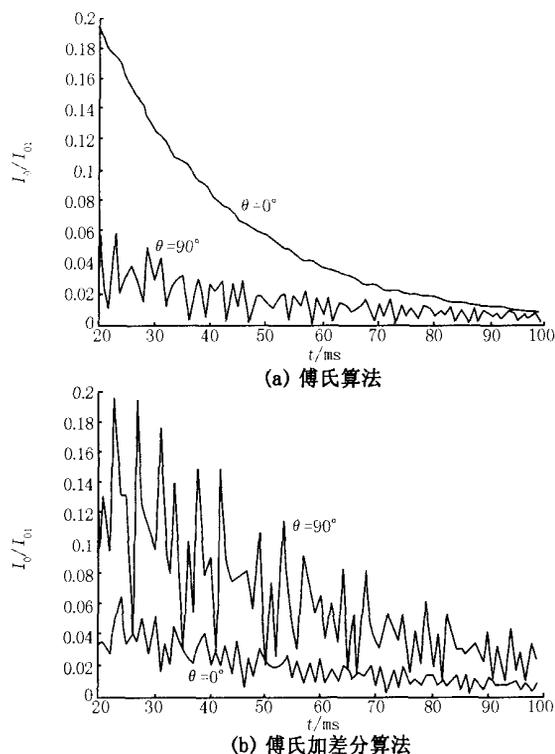


图3 暂态零序电流的大小

Fig. 3 Magnitude of transient zero-sequence current

3 自适应零序电流加速段保护方案

上面的计算结果是以合闸前非全相运行时的零序电流为基值的标么值。故单相重合闸后线路的暂态零序电流的大小与非全相运行零序电流有关,一般不超过20%。单相重合闸是不检同期的,若系统发生非全相振荡,合闸后可能存在较大的暂态零序电流。加速段保护通常采用加速零序电流保护三段或四段的方案,动作电流比较低。故现有保护装置

通常采用 60 ms 延时来躲过合闸时零序电流的暂态过程,以防止保护的误动。由图 3(a)和(b)知,暂态零序电流的大小是衰减的,经过 60 ms 后暂态零序电流已变得很小,一般不会使保护加速段动作。实际运行经验也表明这种方案是可行的。但这种方案在合闸于故障线路时保护也需要经过延时才能切除故障,对于严重故障,会给系统稳定运行带来很不利的影响。

为了提高合闸于故障线路时保护的動作速度,本文提出了一种自适应的零序电流加速保护方案,如图 4 所示。

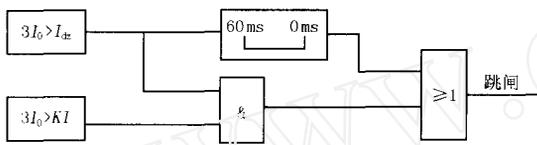


图 4 自适应零序电流加速保护方案

Fig. 4 Adaptive scheme for accelerating segment

图 4 所示方案是在原来的零序电流加速保护中增加一个自适应判据 $3I_0 > KI$ 。 I_{dz} 为零序电流加速段保护整定值。 I 取合闸前的零序电流 $3I_{01}$ 。 K 为自适应系数,必须大于合闸于正常线路时暂态零序电流与 I_{01} 的比值。由上面的讨论结果可知,该比值的最大值为 20% 左右,考虑安全裕度后可取 $K = 0.3$ 。当合闸于正常线路时,由于 $3I_0 > KI$ 的判据不会起动,即使暂态零序电流超过零序电流加速段的整定值,保护也不会误动;而合闸于故障线路时,在一般情况下 $3I_0 > I$,而自适应系数 $K = 0.3$,故自适应判据不会影响保护的動作速度。对于重负荷线路的高阻接地短路故障,零序电流可能会很小,自适应判据可能要拒动,因此保留延时 60 ms 动作的方案,这种故障对系统稳定影响很小,延时动作没有关系。

Adaptive accelerating scheme for zero sequence current protection on single-phase reclosing

YANG Tao, HE Berteng, HUANG Ying

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The paper studies the characteristic of transient zero-sequence current on single-phase reclosing and its influence upon Fourier algorithm and Fourier plus difference algorithm. The fact that transient zero-sequence current mostly contains DC component and harmonic frequency component is detected through theoretical analysis and simulation tests. It also points out that the influence of DC component plays the leading role in Fourier algorithm and harmonic frequency component is more important in Fourier plus difference algorithm. According to the characteristic of transient zero-sequence current, an adaptive accelerating scheme for zero-sequence current protection on single-phase reclosing is presented to overcome the shortcoming in general schemes which needs delaying.

Key words: single-phase reclosing; transient zero-sequence current; adaptive accelerating protection

保护的算法可以采用全波傅氏算法,也可以采用傅氏带差分的算法。

4 结论

1) 单相重合闸时的暂态零序电流主要由非周期分量和高频分量组成。非周期分量的大小与线路长度关系不大,而高频分量的频率和幅值分别随线路长度的增加而降低和增大。

2) 对于傅氏算法,非周期分量的影响占主导地位,而对于傅氏加差分算法,高频分量的影响较大。线路长度较短时,傅氏加差分算法滤波性能优于傅氏算法,线路较长时,傅氏算法滤波性能较好。

3) 采用检测零序电流与合闸相电流比值的自适应判据可以有效地解决常规零序电流加速保护需要延时动作的缺陷。

参考文献:

- [1] 朱声石(ZHU Sheng-shi). 高压电网继电保护原理与技术(Theory and Technology of HV Power Network Protection) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1995.
- [2] 刘万顺(LIU Wann-shun). 电力系统故障分析(Electric Power System Fault Analysis) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1998.

收稿日期: 2003-10-16; 修回日期: 2004-12-01

作者简介:

杨涛(1978-),男,硕士研究生;研究领域为电力系统继电保护;E-mail: Power-forward@sina.com

何奔腾(1959-),男,教授,博导;研究领域为电力系统继电保护和控制;

黄瀛(1976-),男,博士研究生,从事电力系统继电保护和控制的研究。