

直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析

(一) 直流系统等值工频变化量阻抗模型

李海锋¹, 张 璞¹, 王 钢¹, 朱革兰¹, 赵曼勇², 周红阳², 余 江²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640; 2. 中国南方电网电力调度通信中心, 广东省广州市 510623)

摘要: 直流馈入将造成交流电网工频变化量方向保护动作特性发生变化。结合交直流互联电网相互作用机理, 针对工频变化量方向保护原理的分析特点, 建立了适用于工频变化量方向保护动作特性分析的直流系统等值工频变化量阻抗模型, 并在不同短路容量及故障条件下, 对其特性进行了理论分析。基于 PSCAD/EMTDC 对各种直流换相失败进行仿真, 验证了所建模型的有效性和准确性。该模型为进一步分析直流馈入下的工频变化量方向保护动作特性提供了依据。

关键词: 交直流互联电网; 工频变化量; 方向保护; 换相失败

中图分类号: TM773

0 引言

在交直流互联电网中, 由于直流系统自身的特点, 交流电网故障暂态过程可能产生与纯交流电网运行环境不同的特征, 如受端交流系统故障极有可能引起直流系统的换相失败, 在此暂态过程中, 直流系统的等值交流电流、阻抗、功率等电气量均会发生突变, 从而造成交流系统故障特征也随之变得与纯交流系统故障时不同, 这必然会对现有的交流保护的动作为造成影响, 严重时会造成交流保护的误动或拒动。2003 年以来, 南方电网内就先后发生了 2 起因天广直流、三广直流换相失败导致的交流线路保护在区外故障时误动的事故^[1-2]。随着更多直流输电工程的不断投运, 上述问题将变得越发突出。

目前, 针对直流馈入环境下交流保护动作特性的研究较少。文献[3]分析了直流系统谐波对传统交流保护的影响; 文献[4-5]则利用电磁暂态仿真的方法就直流换相失败对交流保护的影响问题进行了定性分析。目前, 对于直流馈入下的交流保护动作特性尚无适合的定量分析模型和方法。在直流馈入环境下, 不同保护原理受到的影响程度不同。从现场运行经验看, 工频变化量方向纵联保护作为国内应用最为广泛的方向纵联保护, 最值得引起关注。

本文作为研究直流馈入对工频变化量方向保护动作特性影响的第 1 部分内容, 着重于建立适用于工频变化量方向保护动作特性分析的直流系统等值

模型。结合交直流互联电网相互作用机理, 针对工频变化量方向保护原理的分析特点, 建立了直流系统等值工频变化量阻抗模型, 并对不同故障条件下的直流系统等值工频变化量阻抗进行了理论分析, 最后基于 PSCAD/EMTDC 对所建模型进行了仿真验证。

1 交直流电网相互作用的数学模型

在交直流互联系统中, 对于受端交流电网, 直流系统等效为由逆变站交流侧母线电压控制的可控电流源。即对于图 1 所示的交直流互联系统, 在各种情况下的分析可采用图 2 所示的等效电路。

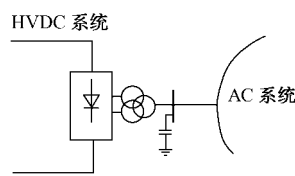
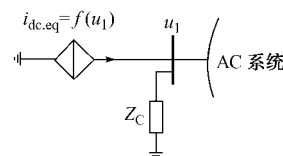


图 1 交直流互联系统

Fig. 1 AC/DC interconnected system



Z_C 为交流滤波器和无功补偿装置的等效阻抗; $i_{dc,eq}$ 为逆变侧直流系统暂态过程所对应的等值交流电流, 它是逆变侧交流母线 (换相母线) 电压 u_1 的压控电流源

图 2 交直流互联系统等效电路

Fig. 2 Equivalent model of AC/DC interconnected system

在不考虑交流系统与直流系统的相互作用时,

收稿日期: 2008-08-21; 修回日期: 2009-01-12。

“十一五”国家科技支撑计划重大项目 (2006BAA02A30); 国家自然科学基金重点项目 (50337010)。

直流逆变侧等值交流电流的变化特性 $i_{dc,eq} = f(u_1)$ 完全由直流系统自身的特性决定,且受控于 u_1 。显然,只有对于一个非常强的受端交流系统,上述条件才近似满足。而对于实际交直流互联系统,直流系统等值电流的变化特性是由直流系统特性(参数与控制系统)与交流系统特性共同决定的,即同时满足下列方程:

$$\begin{cases} f_{dc}(i_{dc,eq}, u_1) = 0 \\ f_{ac}(i_{dc,eq}, u_1) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{dc} 和 f_{ac} 为不考虑相互作用时分别由直流系统和交流系统特性决定的 $i_{dc,eq}$ 与 u_1 的相互关系。

在不同的交直流系统工况下,求解式(1)即可得到对应条件下的直流系统等值电流 $i_{dc,eq}$ 的变化情况。在式(1)中,交流系统所决定的 f_{ac} 是线性的,由网络方程容易获得;而由直流系统确定的 f_{dc} 则是非线性的,比较复杂。因此,式(1)通常只能采用迭代的方法进行求解。

尽管在直流系统暂态过程中, $i_{dc,eq}$ 是动态变化的,但是在给定的时间段内总可以将其分解为基波和各次谐波分量,即 $i_{eq,n}$ 。当然,这里要注意的是,基波和各次谐波分量在暂态过程中也是随时间变化的,准确来说应该是具有时频域特征的。由于现有的继电保护原理主要是基于工频量/工频变化量,因此下面的分析也只考虑各种暂态过程中基频分量的变化情况,这样做有助于揭示问题的本质。

2 直流系统等值工频变化量阻抗模型

工频变化量方向元件实际上是基于阻抗特性的^[6-7]。因此,分析工频变化量方向元件动作特性的关键在于获取直流系统在各种暂态过程中的等值工频变化量阻抗变化特点,即从工频变化量的角度看,对于交流系统而言,直流系统应该等值为何种特性的工频变化量阻抗。下面以图3所示的简单交直流系统模型分析受端交流系统故障时直流系统等值工频变化量阻抗 Z_{dc} 的变化情况。

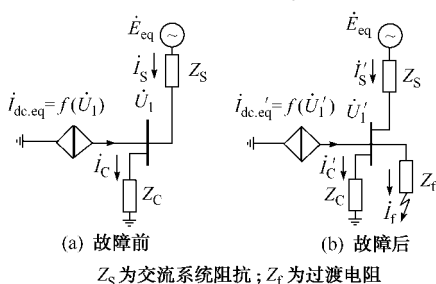


图3 交直流系统的故障分析等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit for AC/DC interconnected system fault analysis

由图3(a)可知,正常运行时:

$$\dot{E}_{eq} - \dot{U}_1 = \dot{I}_s Z_s = \left(\frac{\dot{U}_1}{Z_c} - \dot{I}_{dc,eq} \right) Z_s \quad (2)$$

由此可得:

$$\dot{E}_{eq} \frac{Z_c}{Z_c + Z_s} - \dot{U}_1 = - \dot{I}_{dc,eq} (Z_s // Z_c) \quad (3)$$

由图3(b)可见故障后:

$$\dot{U}_1 = \left(\dot{I}_{dc,eq} + \frac{\dot{E}_{eq} - \dot{U}_1}{Z_s} \right) (Z_c // Z_f) \quad (4)$$

由此可得:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_{dc,eq} (Z_c // Z_f // Z_s) + \dot{E}_{eq} \frac{Z_c // Z_f // Z_s}{Z_s} \quad (5)$$

式(3)和式(5)相加有:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_1 + \dot{E}_{eq} \frac{Z_c}{Z_c + Z_s} &= \dot{I}_{dc,eq} Z - \dot{I}_{dc,eq} (Z_s // Z_c) + \dot{E}_{eq} \frac{Z}{Z_s} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $Z = Z_c // Z_f // Z_s$ 。

由电压、电流工频变化量的定义,有

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_{dc,eq} Z + \dot{I}_{dc,eq} \left(Z - Z_s // Z_c \right) + \dot{E}_{eq} \left(\frac{Z}{Z_s} - \frac{Z_c}{Z_c + Z_s} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\dot{U}_1 = \dot{U}_1 - \dot{U}_1$; $\dot{I}_{dc,eq} = \dot{I}_{dc,eq} - \dot{I}_{dc,eq}$ 。

因此,从交流系统看进去的直流系统等值工频变化量阻抗为:

$$\begin{aligned} Z_{dc} &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_{dc,eq}} = - Z - \left(Z - Z_s // Z_c \right) \cdot \frac{\dot{E}_{eq}}{\dot{I}_{dc,eq}} \left(\frac{1}{Z_s} - \frac{Z_c}{Z_c + Z_s} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

设短路比(SCR,式中记为 k_{SCR})为换流站母线的短路容量与额定直流功率的比值^[8],即

$$k_{SCR} = \frac{S_{ac}}{P_{dN}} = \frac{U_N^2}{P_{dN}} \frac{1}{Z_s} \quad (9)$$

且可近似为:

$$k_{SCR} e^j \frac{\dot{E}_{eq}}{Z_s \dot{I}_{dc,eq}} \quad (10)$$

式中: \dot{E}_{eq} / Z_s 超前 $\dot{I}_{dc,eq}$ 的角度。

代入式(8)可得:

$$\begin{aligned} Z_{dc} &= - Z - \left(Z - Z_s // Z_c \right) \cdot \frac{\dot{E}_{eq}}{Z_s \dot{I}_{dc,eq}} \left(\frac{1}{k_{SCR} e^j} + 1 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可知, Z_{dc} 实际上与多个因素有关,包括系统阻抗 Z_s 、短路阻抗 Z_f 、短路比 k_{SCR} 以及直流

系统等值工频变化量电流 $i_{dc,eq}$ 等。对于给定的交直流互联系统,在发生故障时只需知道直流系统等值电流 $i_{dc,eq}$ (相当于知道 $I_{dc,eq}$) 的变化特性,即可利用式(11)得到相应的直流系统等值工频变化量阻抗 Z_{dc} 的变化特征。因此,关键是如何获取直流系统等值电流的变化特性。

虽然目前直流系统等值工频电流 $i_{dc,eq}$ 主要通过仿真获得,但由直流系统自身的特点可知,在不同的受端系统情况下,只要引起换相失败的程度相同, $i_{dc,eq}$ 的特性是相近的。因此,只需获取直流系统某一换相失败情况下的直流系统等值工频电流特性,便可利用式(11)计算分析在不同受端系统中,发生相同程度换相失败情况下所对应的直流系统等值工频变化量阻抗。由于受端系统的情况千变万化,因此利用式(11)可以大大简化相应的计算分析。

需要指出的是,在不同的受端系统中引起相同程度换相失败的故障条件是不同的,换相失败程度的确定可采用在忽略直流系统情况下,近似以故障后的逆变侧交流母线电压降作为标准。

3 工频变化量阻抗模型的仿真验证

3.1 直流换相失败下的等值工频变化量电流

直流换相失败暂态过程的直流系统等值工频变化量电流是分析工频变化量阻抗变化特性的关键所在。由于直流换相失败暂态过程较为复杂,尚无精确的定量计算方法,本文采用电磁暂态仿真的方法分析直流系统的等值电流变化情况。基于 PSCAD/EMTDC 建立如图 4 所示直流系统模型。该模型与 CIGRE 的 HVDC 标准模型基本相同,唯一的不同在于为了考察不同容量受端交流系统的情况,对受端交流系统进行了一些修改,即在确保直流系统运行参数不变的条件下,修改了受端交流系统的短路容量。

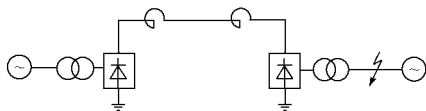


图 4 HVDC 系统的仿真模型
Fig. 4 Simulation model of HVDC system

根据直流系统换相失败的情况,本文将换相失败粗略分成了 4 种情况:换相失败的临界状态、轻微换相失败、较严重换相失败和严重换相失败。其中,轻微换相失败是指只有其中 1 个 6 脉动换流器发生换相失败,较严重换相失败是指 2 个 6 脉动换流器均发生了换相失败,严重换相失败是指 2 个 6 脉动

换流器均发生连续 2 次换相失败。

图 5 为受端系统 $k_{SCR} = 10$ 时的逆变侧交流母线发生 AB 两相短路时的直流系统逆变侧等值工频变化量电流(即换流变交流侧电流)的变化情况。仿真计算中,故障时刻均为 0 s,由于工频量的提取采用全波傅里叶算法,因此图中 20 ms 后才有波形输出。图中幅值变化指工频变化量电流幅值与正常电流幅值的比值变化情况,相位变化则是以正常电流相位为参考时的工频变化量电流相位的变化情况。曲线 1~4 分别对应上述 4 种换相失败情况,它们对应的过渡电阻分别为 95 Ω , 90 Ω , 20 Ω , 2 Ω 。

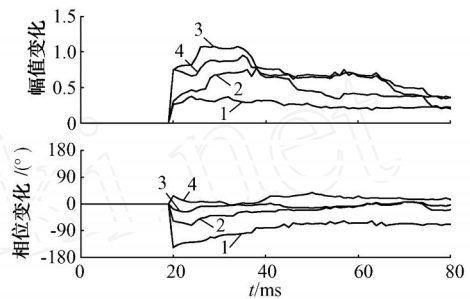


图 5 直流系统逆变侧等值工频变化量电流
Fig. 5 Equivalent power-frequency current variation of HVDC system under different commutation failure

由图 5 可见,不同过渡电阻情况下引起的直流换相失败是不同的,随之产生的直流系统等值工频变化量电流也有所不同。从幅值上看,工频变化量电流基本上随过渡电阻的减少而增加,而相位则是由滞后变为超前。

3.2 直流系统等值工频变化量阻抗的实用计算

根据上面得到的各种换相失败情况下直流系统等值工频变化量电流 $i_{dc,eq}$ 的变化特性,利用式(11)即可对不同受端系统、不同故障条件下的直流系统等值工频变化量阻抗进行分析计算。

图 6 为相同受端电网条件下(即 $k_{SCR} = 10$)利用式(11),根据图 5 所示的 $i_{dc,eq}$ 计算得到的 4 种换相失败情况所对应的 Z_{dc} (虚线)。图中还给出了由仿真直接计算得到的 Z_{dc} (实线)。由图可见, Z_{dc} 和 Z_{dc} 完全一致,表明只需知道 $i_{dc,eq}$,利用式(11)即可精确求解 Z_{dc} 。

图 7 和图 8 分别为在受端交流系统短路容量不同,但发生与图 6 相同程度换相失败情况下,均利用图 5 的 $i_{dc,eq}$ 计算得到的 Z_{dc} (虚线)和对应的通过仿真计算得到的精确值 Z_{dc} (实线)。其中,图 7 为 $k_{SCR} = 5$ 的情况,而图 8 则是 $k_{SCR} = 3$ 时的情况。由图可见,在相同换相失败情况下,利用已知的 $i_{dc,eq}$

($k_{SCR} = 10$ 时) 计算得到的其他受端系统情况下的 Z_{dc} 还是较为精确的。当然,随着受端系统差异的增加,幅值的误差也随之增加,但是相位的计算还是非常准确的。因此总体上,计算结果还是能够有效反映 Z_{dc} 的变化特性。

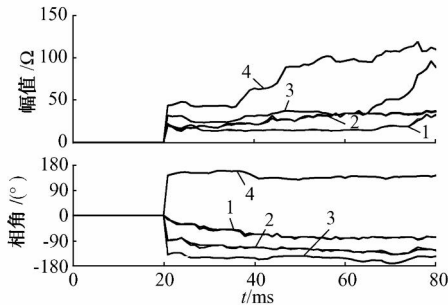


图 6 不同换相失败程度下的直流系统等值工频变化量阻抗 ($k_{SCR} = 10$)

Fig. 6 DC system impedance based on power-frequency variation under different commutation failure ($k_{SCR} = 10$)

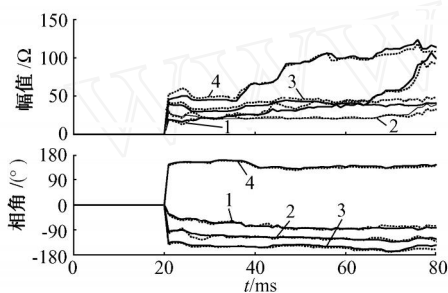


图 7 不同换相失败程度下的直流系统等值工频变化量阻抗 ($k_{SCR} = 5$)

Fig. 7 DC system impedance based on power-frequency variation under different commutation failure ($k_{SCR} = 5$)

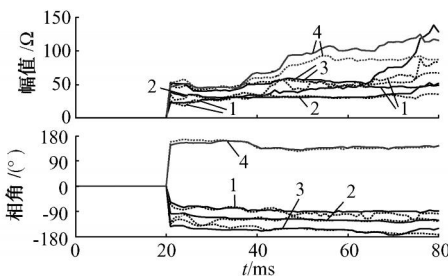


图 8 不同换相失败程度下的直流系统等值工频变化量阻抗 ($k_{SCR} = 3$)

Fig. 8 DC system impedance based on power-frequency variation under different commutation failure ($k_{SCR} = 3$)

4 换相失败下的直流系统等值工频变化量阻抗特性分析

下面利用式(11)进一步分析不同故障条件下的 Z_{dc} 变化特征。

4.1 过渡电阻较大时

$|Z_c| \gg |Z_s|$ 时,此时引起换相失败较轻,再考虑

到 $|Z_c| \gg |Z_s|$,则由式(11),可得:

$$Z_{dc} = Z_s \left(1 + K \frac{E_{eq}}{Z_f I_{dc,eq}} \right) \quad (12)$$

式中: $K = \frac{1}{k_{SCR} e^j} + 1$,实际系统中一般有 $k_{SCR} \gg 1$,则对于不同的 k_{SCR} 值, K 变化不大,可近似为一常数。

由式(12)可知,此时 Z_{dc} 与 Z_s 成比例,显然交流系统越强, Z_s 越小, Z_{dc} 也将越小。而分量

$K \frac{E_{eq}}{Z_f I_{dc,eq}}$ 则在暂态过程中随 $I_{dc,eq}$ 而变化,由于

$I_{dc,eq}$ 位于分母,因此阻抗的变化特性刚好与 $I_{dc,eq}$ 相反。

4.2 过渡电阻较小时

随着 Z_f 的进一步减少,必然导致直流系统换相失败程度的增加。此时有:

$$Z_{dc} = - \frac{Z_s Z_f}{Z_s + Z_f} - K \frac{Z_s E_{eq}}{(Z_s + Z_f) I_{dc,eq}} \quad (13)$$

在这种情况下,虽然 Z_{dc} 受 Z_s 的影响情况与过渡电阻较大时相同,但受影响的程度显然降低了。由于随着 Z_f 的减少,直流系统的特性使得 $I_{dc,eq}$ 增加的程度要小于 Z_f 的减少程度,即随着 Z_f 的减少,

$(Z_s + Z_f) I_{dc,eq}$ 将减少,而使得 $K \frac{Z_s E_{eq}}{(Z_s + Z_f) I_{dc,eq}}$

将增加。由于 $I_{dc,eq}$ 在暂态过程中不断变化,因此对于这种情况 Z_{dc} 变化的幅度将大于过渡电阻较大时的情况。

当严重故障时, $Z_f \rightarrow 0$,式(13)可再次简化为:

$$Z_{dc} = - K \frac{E_{eq}}{I_{dc,eq}} \quad (14)$$

此时对于不同的受端交流系统, Z_{dc} 的变化情况将比较接近。

4.3 直流系统等值工频变化量阻抗特性仿真分析

下面具体分析不同换相失败情况下的直流系统等值工频变化量阻抗特性。利用图 4 所示系统对受端系统短路容量分别为 $k_{SCR} = 5$ 和 $k_{SCR} = 3$ 的 2 种情况下,逆变站交流母线故障引发不同换相失败情况下的直流系统等值工频变化量阻抗进行了仿真计算,如图 9 所示。其中,故障条件为逆变站交流母线 AB 相短路,对于 $k_{SCR} = 5$ 时,过渡电阻分别取 180, 90, 40, 4, 1 对应不同程度的换相失败;而对于短路容量为 $k_{SCR} = 3$ 的情况则取与 $k_{SCR} = 5$ 时相同程度的换相失败进行计算。图 9 中,曲线组 1~5 分别对应上述 5 种不同过渡电阻情况下的

换相失败,过渡电阻由大到小,对应换相失败的严重程度增加。其中虚线为 $k_{SCR} = 3$ 时的情况,实线为 $k_{SCR} = 5$ 时的情况。

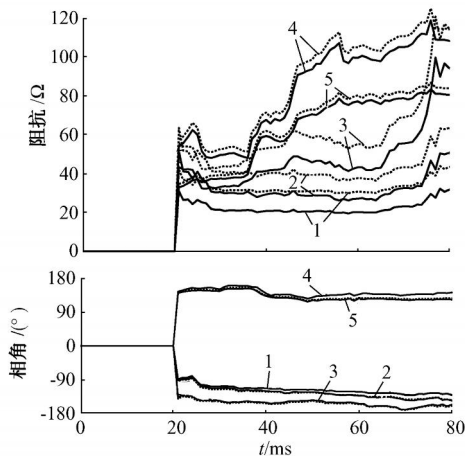


图9 直流换相失败情况下的直流系统等值工频变化量阻抗特性

Fig. 9 Equivalent power-frequency variant impedance of HVDC system with different commutation failure

对图9进行分析,可得如下结论:

1) 一般换相失败情况下(曲线组1~4),工频变化量阻抗的幅值都是在故障初期减小,随后再逐渐增大,最小值约在故障发生后30ms左右。随着交流系统故障过渡电阻的减少,工频变化量阻抗的幅值和变化程度均增加。但是对于非常严重的故障则例外(曲线5),其阻抗幅值比较严重故障时反而减少。

2) 随着系统短路容量的增大,即系统阻抗的减少,直流系统等值工频变化量阻抗幅值也随之减少,而且过渡电阻越大时两者的差异越明显;而严重故障时则对于不同的交流系统短路容量,工频变化量阻抗差异很小。这些与前面的理论分析是一致的。

3) 从阻抗相角特性可知,在换相失败暂态过程中,相角变化较小;一定过渡电阻下的直流换相失败,即图9中曲线1~3,直流系统等值工频变化量阻抗呈现出容性(处于第3象限和第4象限),这与纯交流系统的故障特征不同;而过渡电阻较小时(曲线4和5)则呈现出感性,此时与纯交流系统故障的特征相似。

4.4 工频变化量阻抗特性的进一步探讨

由上面的分析可知,一般情况下直流系统在交流系统故障引起换相失败暂态过程中,在故障初期其等值工频变化量阻抗将会从一个较大的值减少到一个较小的值。对于阻抗而言,显然阻抗越小其影响程度越大,因此这一阻抗变化的时间特性对于分析直流换相失败对工频变化量方向保护的影响至关

重要,下面具体进行分析。

由式(11)可知,换相失败暂态过程中,直流系统等值工频变化量阻抗的变化特性取决于其等值工频变化量电流的变化情况。从交流故障发生到换相失败的产生通常会经过一小段时间。在换相失败发生前,由于直流系统的等值电流变化不会很大,其对应的工频变化量电流也不大;而换相失败的发生将导致直流系统等值电流的突变,从而产生较大的工频变化量电流。

从相量的角度看,对于稳态工频量,采用傅里叶算法时所需数据窗为一个周期,即计算得到的工频相量为一工频周期内的平均效果。图10给出了直流系统发生不连续换相失败情况下,利用傅里叶算法计算直流系统等值工频变化量电流时,电流的幅值与数据窗之间的关系。

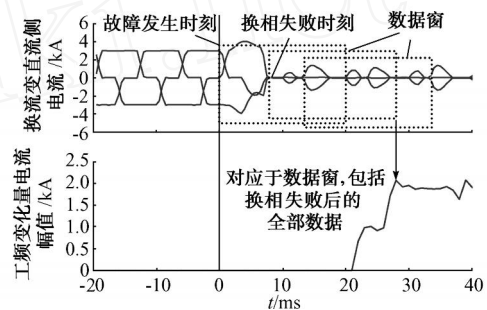


图10 直流换相失败情况下的直流系统等值工频变化量电流特性

Fig. 10 Equivalent power-frequency variant current of HVDC system with commutation failure

由于换相失败的发生通常在故障后较短时间内,因此在故障发生后利用傅里叶算法所计算得到的直流系统等值工频变化量电流实际上包含了换相失败前、后的信息。在故障后第1个数据窗(见图10中的第1个虚线框)由于包含有换相失败前的数据,使得利用其计算得到的直流系统等值工频变化量电流值较小。而随后随着数据窗的向后推移,数据窗中包含的换相失败后信息越来越多,所计算得到的相量也越发体现出换相失败后的特征,即幅值变得越来越大。显然,当数据窗中的数据全部为换相失败发生后的数据时,此时工频变化量电流幅值变得较大,即对应于图10中的第2个虚线框。

由上述分析可知,交流故障引发直流换相失败情况下,直流系统等值工频变化量电流相量在故障初期将会从一个较小的值变化到一个较大的值。而这个较大的值将出现在换相失败发生后的20ms左右,这是因为此时全波傅里叶算法计算相量所需的一个周期的数据刚好全部为换相失败后的数据。由

式(11)可知,工频变化量电流越大,对应的工频变化量阻抗将越小。因此,直流系统等值工频变化量阻抗在换相失败发生后 20 ms 左右也同样会变化为一较小的阻抗值。考虑故障发生到出现直流换相失败的时间一般较短(仿真分析中均不超过 10 ms),因此在故障初期,直流系统等值工频变化量阻抗不断减少,在故障发生后 30 ms 左右变化到一局部最小值。

5 结语

结合交直流互联电网相互作用机理,针对工频变化量方向保护原理的分析特点,建立了直流系统等值工频变化量阻抗模型,并利用该模型对不同故障条件下的直流系统等值工频变化量阻抗变化特性进行了理论和仿真分析,结果表明,该模型可以有效地分析不同换相失败情况所对应的直流系统工频变化量阻抗变化特点,为进一步分析直流馈入下的工频变化量方向保护动作特性提供了定量依据。

参考文献

- [1] 刘之尧,唐卓尧,张文峰,等. 直流换相失败引起继电保护误动作分析. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 104-107.
LIU Zhiyao, TANG Zhuoyao, ZHANG Wenfeng, et al. Analysis of protective relaying mal-operation caused by commutation failure in HVDC. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 104-107.
- [2] 鲁德锋,毛为民,冼伟雄. 直流换流站换流失败引起继电保护不正确动作的分析及防范措施探讨. 电力设备, 2006, 7(1): 54-56.
LU Defeng, MAO Weimin, XIAN Weixiong. Discussion on incorrect action of protection caused by commutation failure in DC converter station and its countermeasures. Electrical Equipment, 2006, 7(1): 54-56.
- [3] ANDERSSON F, JUHLIN L E, JONES T. AC line protection operating conditions in the near vicinity of HVDC installations// Proceedings of Fifth International Conference on Developments in Power System Protection, March 30-April 1, 1993, York, UK: 119-122.
- [4] 邵震,王炳炎. 直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响. 高压技术, 2006, 32(9): 42-45.
SHAO Zhen, WANG Bingyan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 42-45.
- [5] 刘强,蔡泽祥,刘为雄,等. 交直流互联电网暂态功率倒向及对继电保护的影响. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 34-38.
LIU Qiang, CAI Zexiang, LIU Weixiong, et al. Transient power converse in AC/DC interconnected power grid and its influence on protective relaying. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 34-38.
- [6] 沈国荣. 工频变化量方向继电器原理的研究. 电力系统自动化, 1983, 7(1): 1-10.
SHEN Guorong. A new directional relay based on the variation of power frequency components. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 1-10.
- [7] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [8] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析. 北京: 机械工业出版社, 2004.

李海锋(1976—),男,博士,讲师,主要研究方向:电力系统故障分析与继电保护。E-mail: lihf@scut.edu.cn

张璞(1982—),男,博士研究生,主要研究方向:交直流系统故障分析及保护新原理。

王钢(1966—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统保护、控制及自动化。E-mail: wg_scut@263.net

Performance of Directional Protection Based on Variation of Power-frequency Components in HVDC/ AC Interconnected System

Part One DC-system Equivalent Impedance of Power-frequency Component Variation

LI Haifeng¹, ZHANG Pu¹, WANG Gang¹, ZHU Gelan¹, ZHAO Manyong², ZHOU Hongyang², YU Jiang²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Dispatching Center of China Southern Power Grid Co. Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: The HVDC transmission affects the operation of directional protection based on power-frequency component variation for ac transmission lines. Modeling of HVDC system suitable for analysis of the performance of directional protection based on power-frequency component variation is developed. Considering the interaction of HVDC and AC systems, the equivalent DC-system impedance of power-frequency component variation for commutation failures in HVDC system is formulated. The method is used to analyze the DC-system impedance characteristics under the conditions of different commutation failures caused by different faults. Simulations based on CIGRE benchmark HVDC system testify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Mega-projects of Science Research for the 11th Five-year Plan (No. 2006BAA02A30) and National Natural Science Foundation of China (No. 50337010).

Key words: AC/DC interconnected system; power-frequency component variation; directional protection; commutation failure