

DOI: 10.7667/PSPC180583

送出直流对工频变化量元件的影响机理分析

蔡东晓, 李海锋, 祝新驰, 王钢

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 为了从理论上分析送端交流系统工频变化量保护的动作特性, 建立了送端交流系统故障下的整流侧直流系统的等值工频变化量阻抗模型。基于所建立的数学模型, 并结合直流控制系统的故障响应特性, 对不同故障情况下直流系统的等值工频变化量阻抗特性进行了分析, 进而分析了送出直流对工频变化量元件的影响。研究表明: 在送端交流系统故障情况下, 直流等值工频变化量阻抗在大部分条件下呈容性, 可造成工频变化量距离元件保护范围的缩小和工频变化量方向元件的误判。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件对理论研究进行了仿真验证。

关键词: 直流故障特性; 工频变化量; 距离元件; 方向元件; 机理分析

Mechanism analysis of the impact of DC system on power-frequency variation protections

CAI Dongxiao, LI Haifeng, ZHU Xinchu, WANG Gang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to analyze the operating characteristics of power-frequency variation protections of the sending-end AC system theoretically, the mathematical model of DC system at the rectifier side which is represented by a power-frequency variation impedance in fault superimposed network is deduced in the case that fault occurs in the sending-end AC system. Based on the mathematical model and the response characteristics of HVDC control system, the characteristics of the equivalent power-frequency variation impedance of DC system are analyzed under different fault conditions. Then the impact of DC system on power-frequency variation protections is analyzed based on the fault characteristics of DC system. According to the analysis, when fault occurs in the sending-end AC system, the equivalent power-frequency variation impedance of DC system is capacitive under most fault conditions, which reduces the zone of distance protection based on power-frequency variation and results in misjudgment of directional protection based on power-frequency variation. In the end, the result is verified by simulations on PSCAD/EMTDC.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577072).

Key words: fault characteristics of DC system; power-frequency variation; distance element; directional element; mechanism analysis

0 引言

高压/特高压直流输电的迅速发展使得我国交直流混联电网的规模和复杂程度均不断提高。除了在华东、华南等负荷密集区域形成多直流馈入的交流电网外^[1-4], 近年还在逐渐形成含多回直流送出的交流电网, 如通过复龙—南汇、锦屏—苏州±800 kV 特高压直流和德阳—宝鸡±500 kV 高压直流往外送电的四川电网^[5], 以及通过上海庙—山东, 太阳山—绍兴±800 kV 特高压直流和宁东—青岛±600 kV 高压

直流往外送电的宁夏电网^[6]。在交直流混联电网中, 由于换流器的非线性特性及直流控制系统的作用, 其交流电网的故障特性与纯交流电网有所不同, 从而对现有的交流保护造成影响^[7-19]。

由于受端交流系统故障所引发的直流换相失败会对受端电网造成较大的影响, 因此目前围绕交直流混联系统的故障分析及保护动作特性的研究主要集中在受端交流电网。文献[8]通过仿真研究了交直流混联系统在受端交流系统发生故障时的故障特性。文献[9-10]通过建立受端直流系统的等值工频变化量阻抗模型, 研究了直流馈入对交流线路工频变化量方向保护的影响机理, 并提出相应的分析方法。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577072)

文献[11]则进一步利用开关函数分析了换相失败暂态过程中的交流系统工频变化电气量特性。文献[12]通过仿真研究了直流换相失败后交流电气量的瞬态特性及对交流线路保护的影响。文献[13]将换相失败等效为双故障源模型,分析了换相失败对接地距离继电器的影响。文献[14-15]分析了多馈入直流系统发生换相失败时的故障特性。文献[16]建立了混合多馈入直流输电系统模型,对比分析了换相失败情况下混合多馈入直流及常规直流的等值工频变化量阻抗特性。文献[17]研究了不同故障情况下,特高压直流系统换流器的非线性特性对换流变压器差动保护动作特性的影响。文献[18]分析了接入柔性直流的交直流混合系统中,直流系统运行方式的改变对交流线路距离保护的影响。

然而,在送端交流系统发生故障时,虽然直流系统一般不会发生换相失败,但在直流控制系统的影响下,直流系统仍会呈现出和纯交流系统不一样的故障特征,从而对继电保护造成影响,其中以工频变化量保护最为值得引起关注^[19]。目前针对送端交流系统中工频变化量元件动作特性分析方面的研究较少。文献[19]虽然通过仿真分析了送端直流系统对工频变化量距离保护动作特性的影响,但缺乏对于影响机理的深入分析。而且由于整流侧的故障响应特性与逆变侧并不相同,因此也无法直接应用已有的受端交流电网的研究成果。

为此,本文以送端直流输电系统为分析对象,建立了送端交流系统故障下的直流系统等值工频变化量阻抗模型。结合直流控制系统的故障响应特性,对不同故障情况下直流系统的等值工频变化量阻抗特性进行了分析,并分析了送出直流对工频变化量元件的影响机理。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件对理论研究进行了仿真验证。

1 送端交流系统的故障等值电路

当送端交流系统发生故障时,换流母线电压降低,直流控制系统迅速做出响应,送出直流可等效为受换流母线电压控制的电流源。送端交流系统故障等值电路如图 1 所示。

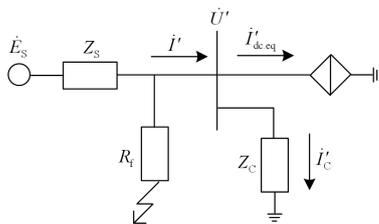


图 1 送端交流系统的故障等值电路

Fig. 1 Fault equivalent circuit of sending-end AC system

图 1 中, Z_s 表示交流电源的系统阻抗, R_f 表示过渡电阻, Z_c 表示交流滤波器以及无功补偿装置等效阻抗, \dot{U}' 表示故障后换流母线电压, $\dot{I}'_{dc,eq}$ 表示直流系统故障等值电流, \dot{I}'_c 表示故障下流过 Z_c 的电流, \dot{I}' 为 $\dot{I}'_{dc,eq}$ 与 \dot{I}'_c 两者之和。

2 直流控制系统故障响应特性

直流控制系统的控制特性如图 2 所示^[20]。直流系统正常运行时,整流侧一般采用定电流控制。当送端交流系统发生故障且过渡电阻较大时,直流控制系统通过减少触发角 α 维持直流电流在额定值,此时系统运行在图 2 中的 A 点。随着过渡电阻的减小, α 减小到下限值 α_{min} , 逆变侧先是进入电流偏差控制(图 2 中曲线 ABC), 然后过渡到低压限流控制(图 2 中曲线 CD), 限制短路电流。当过渡电阻较小时,换流母线电压跌落大, 逆变侧进入定最小电流 I_{dmin} 控制, 系统运行于图 2 中的曲线 DE 上。

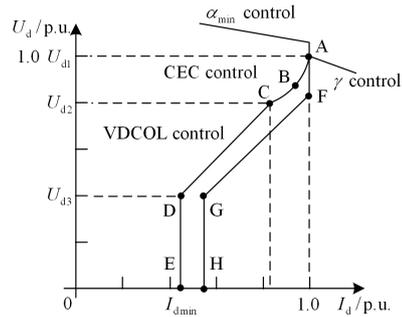


图 2 直流系统控制特性图

Fig. 2 Response characteristics of HVDC control system

图 2 中, U_d 和 I_d 分别代表直流电压和直流电流, α 为触发角, γ 为熄弧角。

送端交流系统发生故障时,直流电流和直流电压的关系可用分段函数来表示。

$$I_d = \begin{cases} k_1 U_d + b_1 & U_{d2} < U_d \leq U_{d1} \\ k_2 U_d + b_2 & U_{d3} < U_d \leq U_{d2} \\ I_{dmin} & 0 < U_d \leq U_{d3} \end{cases} \quad (1)$$

其中: k_1 、 b_1 、 k_2 、 b_2 、 U_{d1} 、 U_{d2} 、 U_{d3} 和 I_{dmin} 由直流控制系统的参数可以得到。

3 直流等值工频变化量阻抗模型

现代微机保护主要关注电气量的工频分量或工频变化量。送端交流系统发生故障时,由于控制系统的作用,在故障附加网络中直流系统等值为非线性的阻抗。直流系统等值工频变化量阻抗定义为

$$\Delta Z_{dc} = \frac{\Delta \dot{U}}{\Delta \dot{I}} = \frac{\dot{U}' - \dot{U}}{\dot{I}' - \dot{I}} \quad (2)$$

其中: \dot{U} 为换流母线的额定电压; \dot{I} 为正常运行时换流母线流进直流系统的电流; $\Delta \dot{U}$ 、 $\Delta \dot{I}$ 分别表示工频变化量电压和电流。

在故障附加网络中, ΔZ_{dc} 需考虑交流系统滤波器及无功补偿装置的影响。送端直流系统在正常运行时, 系统的无功补偿约占直流功率的 60%。直流系统正常运行时的电流关系如图 3 所示。

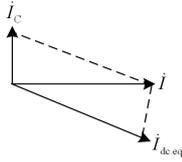


图 3 直流系统正常运行时的电流相量图

Fig. 3 Phasor diagram of currents under normal operation

图 3 中, $\dot{I}_{dc.eq}$ 表示正常运行时直流系统的等值电流, \dot{I}_C 表示流过 Z_C 的电流。 Z_C 不受故障影响, 由于 $\dot{I}'_C = \dot{U}' / Z_C$, 因此故障后 \dot{I}'_C 幅值和相角的变化与换流母线电压的变化一致。通过故障前 \dot{I}_C 与 $\dot{I}_{dc.eq}$ 的关系以及故障后 \dot{I}'_C 与 \dot{U}' 的关系, 即可把 Z_C 的影响考虑进 ΔZ_{dc} 中。

换流器在正常运行时, 相电压和相电流的关系如图 4 所示。

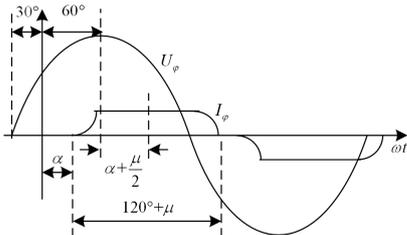


图 4 换流器相电压及相电流的相位关系

Fig. 4 Phase relationship between bus voltage and bus current

图 4 中 μ 为换相角。直流系统正常运行时, 阀的正半波导通时间为 $120^\circ + \mu$, 取其中线作为基波电流的正半波中线, 可得相电压和相电流的相位差约为

$$\varphi = \alpha + \mu / 2 \quad (3)$$

令 k_u 为换流母线电压故障后与故障前的幅值之比, k_i 为直流电流故障后与故障前的幅值之比。根据换流器的特性, 直流等值电流的大小主要受直流电流的影响, 可得

$$\begin{cases} k_u = U' / U \\ k_i = I'_d / I_d \approx I'_{dc.eq} / I_{dc.eq} \end{cases} \quad (4)$$

设 \dot{U} 的相角为 φ_u , \dot{U}' 的相角为 φ'_u , \dot{U}' 与 $\dot{I}'_{dc.eq}$ 的相角差为 φ' , 直流等值工频变化量阻抗表达式为

$$\begin{aligned} \Delta Z_{dc} &= (\dot{U}' - \dot{U}) / (\dot{I}' - \dot{I}) = \\ &= (k_u U e^{j\varphi'_u} - U e^{j\varphi_u}) / (k_i I_{dc.eq} e^{j(\varphi'_u - \varphi')} + \\ &= k_u I_C e^{j(\varphi'_u - \pi/2)} - I e^{j\varphi_u}) = \\ &= (k_u U e^{j\varphi'_u} - U e^{j\varphi_u}) / (k_i I_{dc.eq} e^{j(\varphi'_u - \varphi')} - \\ &= k_u I_{dc.eq} e^{j(\varphi'_u - \varphi)} + k_u I e^{j\varphi'_u} - I e^{j\varphi_u}) \end{aligned} \quad (5)$$

定义 θ 为故障后换流母线电压滞后的电角度, 即 $\theta = \varphi_u - \varphi'_u$, 式(5)整理可得

$$\Delta Z_{dc} = \frac{U}{I_{dc.eq}} \times \frac{A + Bj}{M} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} A = k_i k_u \cos \varphi' + \cos \varphi - k_u \cos(\varphi - \theta) - \\ \quad k_i \cos(\varphi' + \theta) \\ B = k_i k_u \sin \varphi' - k_u^2 \sin \varphi + k_u \sin(\varphi + \theta) - \\ \quad k_i \sin(\varphi' + \theta) \\ M = (k_i \sin \varphi' - k_u \sin \varphi + \cos \varphi \sin \theta)^2 + \\ \quad (k_i \cos \varphi' - \cos \varphi \cos \theta)^2 \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)可知, ΔZ_{dc} 受系统运行方式、过渡电阻、故障类型和控制系统参数等的影响。在不同程度故障下, 直流控制系统故障响应特性不同, 下面主要从轻微故障及严重故障两个角度分析 ΔZ_{dc} 的故障特性。

4 直流系统故障等值特性

4.1 送端交流系统发生轻微故障

当送端交流系统发生三相短路故障且过渡电阻较大时, 由于三相电压对称, 故障后图 4 中相电压和相电流关系仍成立, 可得

$$\varphi' = \alpha' + \mu' / 2 \quad (8)$$

当送端交流系统发生两相短路及两相短路接地故障时, 由于故障后换流母线电压跌落小, 三相电压不平衡程度较小, 此时直流系统的故障特性与三相短路故障时相似。轻微故障下整流侧仍处于定电流控制, 逆变侧仍处于定 γ_0 角控制, 此时有

$$\begin{cases} k_i = 1 \\ k_u - \cos \theta \approx 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(7)化简可得

$$\begin{cases} A \approx \sin \theta [\sin(\alpha' + \mu' / 2) - \sin(\alpha + \mu / 2 - \theta)] \\ B \approx \sin \theta [k_u \cos(\alpha + \mu / 2) - \cos(\alpha' + \mu' / 2)] \end{cases} \quad (10)$$

ΔZ_{dc} 的相角特性由式(10)决定。由换流器换相角公式可得

$$\alpha + \mu/2 = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\cos \alpha - \frac{\sqrt{2} X_r I_d}{E} \right) + \frac{1}{2} \alpha \quad (11)$$

其中: X_r 为换相电抗; E 为换相电压有效值。由式(11)可知, $\alpha + \mu/2$ 的增减性主要受 α 的影响。送端交流系统发生故障后, 直流控制系统将减小触发角以维持直流电流恒定。此时有

$$\begin{cases} \alpha' + \mu'/2 < \alpha + \mu/2 \\ k_u \cos(\alpha + \mu/2) - \cos(\alpha' + \mu'/2) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

由于 U 、 $I_{dc,eq}$ 和 M 恒大于零, 结合式(7)和式(12)可得, 在故障轻微情况下, ΔZ_{dc} 呈容性。

故障后换流母线电压跌落小, 且定电流控制将直流电流保持在额定值, 因此在轻微故障下过渡电阻的变化对 ΔZ_{dc} 影响较小。

下面从物理意义的角度对 ΔZ_{dc} 的相角特性进行分析。直流系统的无功补偿方式通常采用全补偿, 正常运行时 \dot{U} 和 \dot{i} 同相位。轻微故障时, 换流母线电压减少, 无功补偿减少。由于定电流控制的作用, $\dot{I}'_{dc,eq}$ 幅值变化不大, 直流输送功率基本不变, 交流系统要向直流系统提供无功功率, 因此故障后 \dot{U}' 落后于 \dot{i}' 。故障前后电压电流关系如图 5 所示。

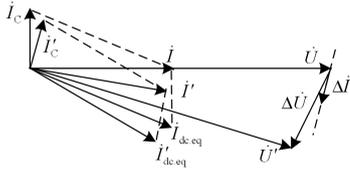


图 5 轻微故障下电压电流相量图

Fig. 5 Phasor diagram of currents and voltages for faults with high resistance

由图 5 可得换流母线的工频变化量电压落后于工频变化量电流, ΔZ_{dc} 呈容性。

4.2 送端交流系统发生严重故障

当送端交流系统发生三相短路故障且过渡电阻较小时, 故障后换流母线电压跌落大, 整流侧进入定 α_{min} 控制, 逆变侧进入定最小电流控制。此时有

$$k_i = I_{dmin} / I_{dN} = k_{min} \quad (13)$$

其中, I_{dN} 为直流电流额定值。式(7)化简可得

$$\begin{cases} A \approx \cos(\alpha + \mu/2) - k_{min} \cos(\alpha_{min} + \mu'/2 + \theta) \\ B \approx k_u \sin(\alpha + \mu/2 + \theta) - k_{min} \sin(\alpha_{min} + \mu'/2 + \theta) \end{cases} \quad (14)$$

ΔZ_{dc} 的相角特性由式(14)决定。通常情况下直流系统换流母线电压跌落至 40% 时即进入定最小电流控制, k_{min} 的值一般为 0.45。由于故障后换相角增大, 此时 $\sin(\alpha + \mu/2 + \theta)$ 的值与 $\sin(\alpha_{min} + \mu'/$

$2 + \theta)$ 差异较小, B 接近于零, 因此在直流系统刚进入定最小电流控制时, ΔZ_{dc} 接近于纯阻性。

随着过渡电阻的减小, k_u 逐渐减小, ΔZ_{dc} 相角绝对值增大, 在金属性故障情况下, $B \approx -k_{min} \sin(\alpha_{min} + \mu'/2 + \theta) < 0$, ΔZ_{dc} 呈现出容性。由于故障严重时换流母线电压角度变化大, 即 θ 值较大, 结合式(14)可得 A 的值大于零, ΔZ_{dc} 位于第四象限。

ΔZ_{dc} 还受系统运行方式的影响, 以金属性故障为例, ΔZ_{dc} 相角如式(15)所示。

$$\varphi_{\Delta Z_{dc}} = -\tan^{-1} \left(\frac{k_{min} \sin(\alpha_{min} + \mu'/2 + \theta)}{\cos(\alpha + \mu/2) - k_{min} \cos(\alpha_{min} + \mu'/2 + \theta)} \right) \quad (15)$$

直流系统正常运行时处于额定运行状态, 输送功率为 P_{dN} 。当直流系统输送功率减少即直流电流减小时, 与额定运行状态相比, 直流等值电流减小且 α 值增大, 结合式(6)和(15)可得 ΔZ_{dc} 幅值增大, 相角绝对值增大。

当送端交流系统发生两相短路及两相短路接地故障时, 故障后三相电压不平衡, 式(7)化简可得

$$\begin{cases} A \approx \cos(\alpha + \mu/2) - k_{min} \cos(\varphi' + \theta) \\ B \approx k_u \sin(\alpha + \mu/2 + \theta) - k_{min} \sin(\varphi' + \theta) \end{cases} \quad (16)$$

与上述分析类似, 此时 ΔZ_{dc} 的故障特性与三相短路故障时相似。

下面从物理意义的角度对严重故障情况下 ΔZ_{dc} 的相角特性进行分析。过渡电阻很小时, 直流输送功率大幅减少, 消耗的无功功率也减少, 交流系统会吸收多余的无功补偿功率, 因此故障后 \dot{U}' 超前于 \dot{i}' 。由于定最小电流控制的作用, $I'_{dc,eq} / I_{dc,eq} \approx k_{min}$, 故障前后电压电流关系如图 6 所示。

由图 6 可得换流母线的工频变化量电压落后于工频变化量电流, ΔZ_{dc} 呈容性。

综上所述, 送端交流系统发生三相短路、两相短路或者两相短路接地故障时, ΔZ_{dc} 具有相似的特性, 大部分情况下呈容性。

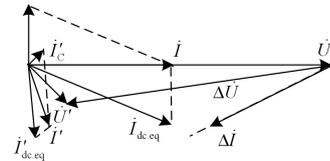


图 6 严重故障下电压电流相量图

Fig. 6 Phasor diagram of currents and voltages for faults with small resistance

文献[21]通过仿真分析表明, 送端交流系统发

生单相接地故障时, 直流等值工频变化量阻抗特性与纯交流系统相似, 本文不再展开研究。

4.3 仿真验证

以 CIGRE HVDC 标准测试模型为对象, 结合 PSCAD/EMTDC 仿真软件进行仿真验证。在 CIGRE 模型整流侧交流系统处分别设置不同类型及不同程度的故障, 通过仿真得到的直流等值工频变化量阻抗特性如图 7—图 9 所示。仿真计算中以故障发生时刻作为 0 时刻, 由于采用全波傅里叶算法提取工频量, 因此图中 20 ms 后才有波形输出。

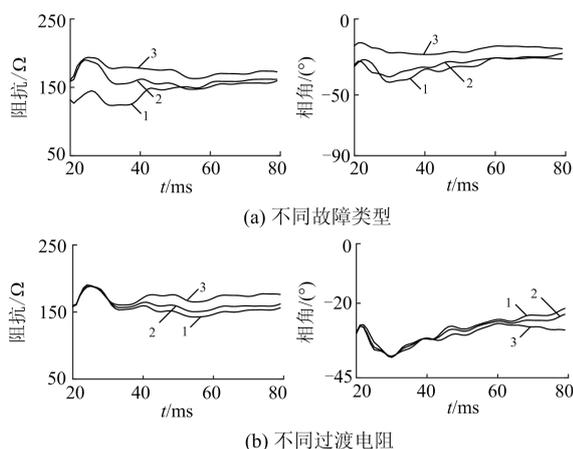


图 7 轻微故障下的直流故障特性仿真值

Fig.7 Simulation results when faults with high resistance occur in the sending-end AC system

图 7 为交流系统发生轻微故障时的 ΔZ_{dc} 仿真值。

图 7(a)中曲线 1—3 分别对应三相短路、两相短路接地及两相短路三种不同的故障类型, 过渡电阻均为 400Ω 。图 7(b)中故障类型均为两相短路接地, 曲线 1—3 的过渡电阻分别为 450Ω 、 350Ω 及 250Ω 。由图 7 可得, 不同类型故障下 ΔZ_{dc} 表现出相似的特性, 相角均为容性, 在轻微故障下由于定电流控制的作用, 过渡电阻的变化对 ΔZ_{dc} 的影响较小。仿真结果与理论分析结果一致。

图 8 为交流系统发生严重故障时的直流故障特性仿真值。图 8(a)中曲线 1—3 分别对应三相短路、两相短路接地及两相短路三种不同的故障类型, 过渡电阻均为 0Ω 。图 8(b)中故障类型均为两相短路接地, 曲线 1—3 的过渡电阻分别为 10Ω 、 5Ω 及 0Ω 。由图 8 可以看出, 故障严重时, ΔZ_{dc} 相角较小, 且随着过渡电阻的减小, ΔZ_{dc} 相角绝对值增大。在金属性故障下 ΔZ_{dc} 呈容性, 相角位于第四象限, 不同类型故障下的 ΔZ_{dc} 具有相似特性。仿真结果与理论分析结果一致。

图 9 为交流系统发生两相短路接地故障时直流

系统处于不同运行方式下的直流故障特性仿真值, 过渡电阻均为 0Ω , 其中曲线 1—3 中直流系统的输送功率分别为 P_{dN} 、 $0.75P_{dN}$ 及 $0.5P_{dN}$ 。由图 9 可得, 当直流输送功率减少时, ΔZ_{dc} 幅值增大, 相角绝对值增大, 仿真结果与理论分析结果一致。

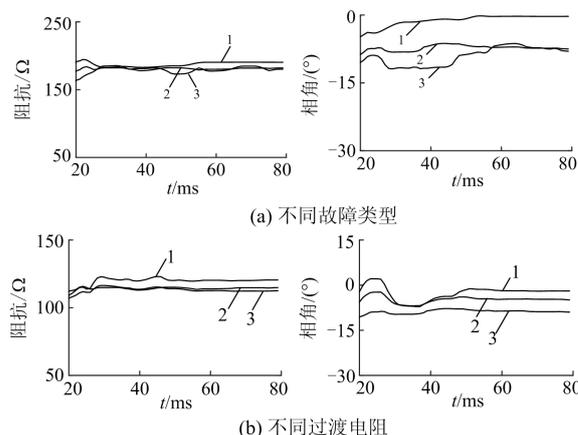


图 8 严重故障下的直流故障特性仿真值

Fig. 8 Simulation results when faults with small resistance occur in the sending-end AC system

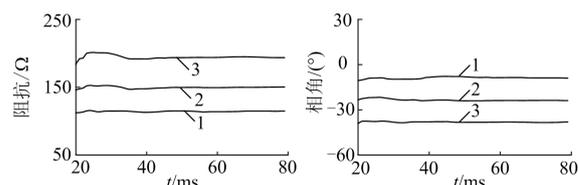


图 9 不同运行方式下直流故障特性仿真值

Fig. 9 Simulation results under different operation modes

5 送出直流对工频变化量元件的影响

5.1 工频变化量距离元件

工频变化量距离元件利用工频附加分量电流、电压判别故障, 其动作判据为^[22]

$$|\Delta \dot{U}_{op}| \geq k_{rel} U_N \quad (17)$$

其中: $\Delta \dot{U}_{op}$ 为保护范围末端的整定电压; k_{rel} 为可靠系数, 一般取 $1.1 \sim 1.2$; U_N 为线路额定电压。由式(17)推导可得^[23-25]

$$\begin{cases} |Z_s + Z'_{zd}| \geq |Z_s + Z_m| \\ Z'_{zd} = \frac{1}{k_{rel}} Z_{zd} + \left(\frac{1}{k_{rel}} - 1\right) Z_s \end{cases} \quad (18)$$

其中: Z_{zd} 为整定阻抗; Z_m 为测量阻抗; Z_s 为系统阻抗; Z'_{zd} 为考虑了 k_{rel} 和 Z_s 影响后的等值整定阻抗。由式(18)可得, 工频变化量距离元件的动作范围由 Z_s 和 Z'_{zd} 决定, 而且 Z'_{zd} 还可能受 Z_s 的影响。由于过渡电阻会影响工频变化量阻抗的保护范围^[25],

在分析送出直流对工频变化量元件的影响时，主要考虑金属性故障的情况。

在纯交流系统中，交流系统阻抗 Z_S 为感性，在交直流系统中， Z_S 即为直流等值阻抗 ΔZ_{dc} ，当送端交流系统发生金属性故障时， ΔZ_{dc} 呈容性。忽略 Z_S 对 Z'_{zd} 的影响，即取 $k_{rel} = 1$ 时，纯交流系统以及交直流系统的距离元件在正方向故障时的动作特性圆如图 10 所示。

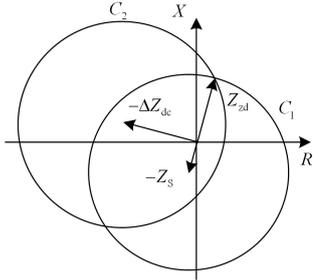


图 10 工频变化量距离元件正方向故障时的动作特性圆
Fig. 10 Operating characteristics of distance element based on the power-frequency variation when forward faults occur

图 10 中， Z_S 为纯交流系统阻抗， ΔZ_{dc} 为直流等值工频变化量阻抗， C_1 为纯交流系统的动作特性圆， C_2 为交直流系统的动作特性圆。由图 10 可得，当 ΔZ_{dc} 呈容性时，工频变化量距离保护的正方向保护范围减小，保护的灵敏度降低。

由前面分析可得，直流输送功率减小时， ΔZ_{dc} 幅值增大，相角绝对值增大。金属性故障情况下，直流系统处于不同运行方式时工频变化量距离元件的动作特性圆如图 11 所示。

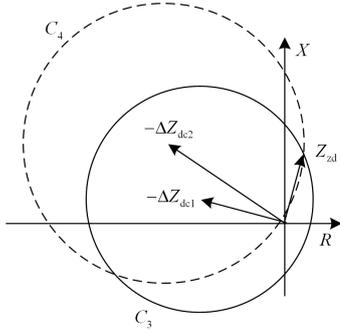


图 11 不同运行方式下工频变化量距离元件的动作特性圆
Fig. 11 Operating characteristics of distance element based on the power-frequency variation under different operation modes

图 11，中 ΔZ_{dc1} 为直流系统额定运行状态下的直流等值工频变化量阻抗， ΔZ_{dc2} 为输送功率减小时的直流等值工频变化量阻抗， C_3 、 C_4 分别为对应的保护动作特性圆。由图 11 可得，直流输送功率减

小时，保护动作特性圆往第二象限移动，进一步缩小正方向的保护范围。

当 $k_{rel} > 1$ 时， Z'_{zd} 会受 ΔZ_{dc} 的影响，此时交直流系统距离元件动作特性圆如图 12 所示。

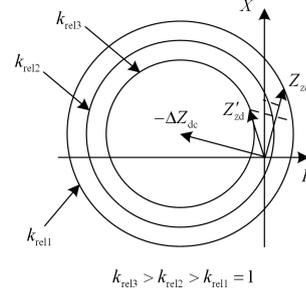


图 12 交直流系统工频变化量距离元件动作特性圆 ($k_{rel} > 1$)
Fig. 12 Operating characteristics of distance element based on the power-frequency variation in HVDC system ($k_{rel} > 1$)

由图 12 可得，随着 k_{rel} 的增大，等值整定阻抗逐渐往第二象限移动，工频变化量距离元件的正方向保护范围逐渐缩小，当 k_{rel} 大到一定程度时，可能会失去保护范围。

5.2 工频变化量方向元件

工频变化量方向元件利用工频变化量电流、电压判别故障方向，不受系统运行方式的影响，灵敏性高。送端交流系统发生故障时的故障附加网络如图 13 所示。

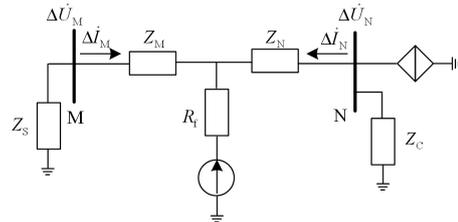


图 13 故障附加网络
Fig. 13 Fault super-imposed network

图 13 中， Z_M 和 Z_N 为线路阻抗。以图 13 中参考方向为例，工频变化量方向元件通过判别 $\Delta \dot{U}$ 及 $\Delta \dot{I}$ 的相角，在两者反向时动作，动作判据为^[26]

$$\text{Im}(\Delta \dot{U} / \Delta \dot{I}) = \text{Im}(-\Delta Z) < 0 \quad (19)$$

由式(19)可得工频变化量方向元件能正确判别正方向故障的条件为其感受到的背侧系统等值工频变化量阻抗呈感性。

对于 M 侧而言， ΔZ_M 即为系统阻抗 Z_S ，M 侧工频变化量方向元件可以正确判别故障。对于 N 侧保护而言，在过渡电阻较大或金属性故障时 ΔZ_N 均为容性，此时工频变化量方向元件无法正确动作。

受端交流系统发生故障时，容易引起逆变侧发

生换相失败。文献[9-10]分析表明, 逆变侧换相失败主要对故障线路靠近直流系统侧的工频变化量方向元件产生影响, 过渡电阻较大时影响更严重, 可能会导致方向元件拒动。与逆变侧类似, 整流侧交流系统故障主要影响故障线路上靠近直流系统侧的工频变化量方向元件。当过渡电阻较大时, 整流侧与逆变侧的直流等值故障特性相似。与逆变侧不同的是, 整流侧交流系统发生严重故障时, 过渡电阻越小, 工频变化量方向元件越有可能拒动。

5.3 仿真验证

在 CIGRE HVDC 模型的基础上搭建交直流互联系统仿真模型, 如图 14 所示。线路长度为 60 km, 线路正序参数为: $r_1=0.020\ 83\ \Omega/\text{km}$, $l_1=0.894\ 8\ \text{mH}/\text{km}$, $c_1=0.012\ 9\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。线路零序参数为: $r_0=0.114\ 8\ \Omega/\text{km}$, $l_0=2.288\ 6\ \text{mH}/\text{km}$, $c_0=0.005\ 23\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。

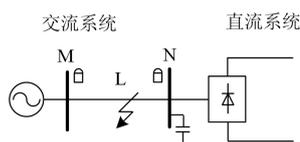


图 14 交直流互联系统仿真模型

Fig. 14 Simulation model of AC/DC interconnected system

采用式(17)作为工频变化量距离元件的动作判据, 可靠系数取 1.1, 保护范围为线路全长的 85%。分别在 M 侧保护出口处及 N 侧保护出口处设置 AB 两相短路故障, 相应的距离元件工作电压的仿真结果如图 15 所示。

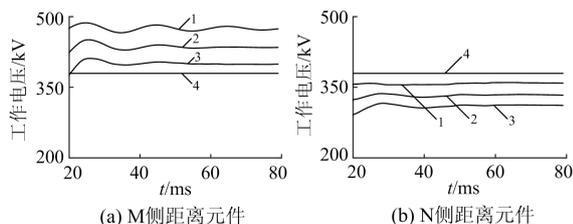


图 15 距离元件工作电压

Fig. 15 Operating voltage of distance relay

图 15(a)中故障位置在 M 侧保护出口处, 曲线 1—3 分别表示金属性、 $15\ \Omega$ 过渡电阻和 $30\ \Omega$ 过渡电阻三种故障下的 M 侧距离元件工作电压, 曲线 4 为参考电压。图 15(b)中故障位置在 N 侧保护出口处, 曲线 1—4 代表的意义与图 15(a)相似。由图 15 可得, M 侧保护元件的工作电压均大于参考电压, 保护能正确动作, 而 N 侧保护由于直流系统的影响不能正确动作。

工频变化量方向元件采用相间突变电流和相间突变电压相位比较的方式来判别故障, 当相

位位于第一、二象限时判为正方向故障, 否则判为反方向故障。在线路中点处设置 AB 两相短路故障, M 侧方向元件和 N 侧方向元件的判别结果如图 16 所示。

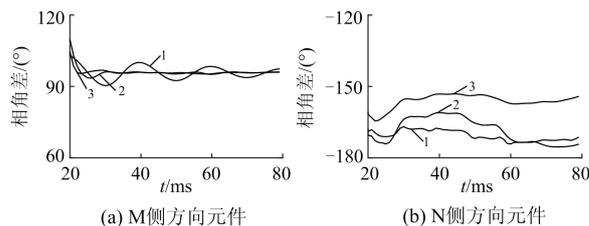


图 16 方向元件判别结果

Fig. 16 Response of the directional relay

图 16(a)中曲线 1—3 分别表示金属性故障、 $100\ \Omega$ 过渡电阻和 $250\ \Omega$ 过渡电阻三种不同故障下 M 侧方向元件的比相结果。图 16(b)为 N 侧方向元件的比相结果, 曲线 1—3 的故障情形和图 16(a)一致。由图 16 可得, M 侧方向元件均可正确动作, N 侧方向元件均无法动作。

6 结论

(1) 送端交流系统发生三相短路、两相短路及两相短路接地故障时, 直流等值工频变化量阻抗 ΔZ_{dc} 表现出相似的故障特性, 大部分情况下为容性。

(2) 送端交流系统发生除单相接地外的金属性故障时, 直流系统的等值工频变化量阻抗 ΔZ_{dc} 位于第四象限, 会使靠近直流侧输电线路的工频变化量距离元件的动作特性圆往第二象限移动, 减小正方向的保护范围。直流输送功率的减小以及保护可靠性系数的增大都会进一步减小工频变化量距离元件的保护范围, 严重时可能使其失去保护范围。

(3) 送端交流系统发生除单相接地外的高阻故障或金属性故障时, 直流系统的等值工频变化量阻抗均可呈现出容性, 此时工频变化量方向元件将无法正确判别故障方向。

参考文献

- [1] 李碧君, 李兆伟, 吴雪莲, 等. 多直流馈入受端电网两段式频率安全紧急控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(2): 169-175.
LI Bijun, LI Zhaowei, WU Xuelian, et al. Study on the two-stage frequency security emergency control strategy for multi-infeed HVDC receiving systems[J]. Electric Power, 2017, 50(2): 169-175.
- [2] 范璇, 张玉红, 苏苏宁, 等. 多直流馈入受端电网短路电流控制水平研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 61-67.
FAN Xuan, ZHANG Yuhong, SU Lining, et al. Research

- on short circuit current control in multi-infeed DC receiving power grid[J]. *Smart Power*, 2018, 46(3): 61-67.
- [3] 潘捷, 郑惠萍, 张红丽, 等. ± 800 kV 雁淮特高压直流送端电网安全稳定特性及控制策略[J]. *中国电力*, 2018, 51(4): 7-14.
PAN Jie, ZHENG Huiping, ZHANG Hongli, et al. Security stability analysis and control strategy of sending-end power grid of ± 800 kV Yan-Huai UHVDC[J]. *Electric Power*, 2018, 51(4): 7-14.
- [4] 易杨, 龙霏, 林建熙, 等. 多馈入直流系统的 VSC-HVDC 落点优选方法[J]. *智慧电力*, 2017, 45(12): 39-45.
YI Yang, LONG Fei, LIN Jianxi, et al. Optimal position of VSC-HVDC access to multi-infeed HVDC system[J]. *Smart Power*, 2017, 45(12): 39-45.
- [5] 陈虎, 贺洋, 张英敏, 等. 四川电网多送出直流输电系统交互影响分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(4): 21-26.
CHEN Hu, HE Yang, ZHANG Yingmin, et al. Interaction analysis of multi-send HVDC systems of sichuan power grid[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2011, 23(4): 21-26.
- [6] 丁茂生, 高峰, 李宏强. 上海庙-山东特高压直流接入对宁夏电网的影响[J]. *宁夏电力*, 2015(3): 1-6.
DING Maosheng, GAO Feng, LI Hongqiang. Influence of UHVDC power transmission from Shanghai temple to Shandong accessing on Ningxia power grid[J]. *Ningxia Electric Power*, 2015(3): 1-6.
- [7] ANDERSSON F, JUHLIN L E, JONES T. AC line protection operating conditions in the near vicinity of HVDC installations[C] // *Proceedings of Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, March 30-April 2, 1993, York, UK: 119-122.
- [8] 索南加乐, 张健康, 焦在滨, 等. 交直流混联电网交流系统故障特性分析[J]. *高电压技术*, 2010, 36(6): 1461-1467.
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, JIAO Zaibin, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(6): 1461-1467.
- [9] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 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[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(9): 41-46.
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. 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[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(9): 41-46.
- [10] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(二)故障线路的方向保护[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(10): 47-53.
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part two response of the directional protection for faulted line[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(10): 47-53.
- [11] 刘俊磊, 王钢, 李海锋, 等. HVDC 系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 111-118.
LIU Junlei, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on AC power network relay protection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 111-118.
- [12] 雷虹云, 于占勋, 赵强, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(二)直流换相失败瞬态特征分析及对交流线路保护的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(24): 65-71.
LEI Hongyun, YU Zhanxun, ZHAO Qiang, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection part two: analysis of fault transient response characteristics and influence of HVDC commutation failure on AC line protections[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(24): 65-71.
- [13] 黄少锋, 费彬, 申洪明, 等. 换相失败对距离保护的影响分析及防范措施的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(20): 123-128.
HUANG Shaofeng, FEI Bin, SHEN Hongming, et al. Effect of commutation failure on distance protection and the countermeasures[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(20): 123-128.
- [14] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure in single- and multi-infeed HVDC systems[C] // *Proceedings of the 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission*, March 28-31, 2006, London, UK: 182-186.
- [15] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1): 378-384.
- [16] 徐岩, 刘泽楷, 应璐曼. 混合 MIDC 馈入下的工频变化量阻抗方向保护动作特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(5): 14-20.
XU Yan, LIU Zekai, YING Luman. Performance of impedance directional protection based on variation of power-frequency components in hybrid multi-infeed

- HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 14-20.
- [17] 林磊, 陈川, 胡鑫, 等. 不同故障下特高压换流变压器差动保护动作特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 123-133.
LIN Lei, CHEN Chuan, HU Xin, et al. Research on the characteristics of ultra-high voltage converter transformer differential protection under the internal and external faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 123-133.
- [18] 王鹤, 刘宇超, 李国庆, 等. 接入 MMC-HVDC 的交流系统线路自适应距离保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 7-13.
WANG He, LIU Yuchao, LI Guoqing, et al. Adaptive distance protection of AC system in the presence of modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 7-13.
- [19] 张健康, 索南加乐, 何方明, 等. 交直流混联电网工频变化量距离保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 98-103.
ZHANG Jiankang, SUONAN Jiale, HE Fangming, et al. Performance analysis of distance protection based on industrial frequency variation applied to AC-DC hybrid grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 98-103.
- [20] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [21] LIU Jinping, LI Haifeng, MAI Guohao, et al. Study on fault characteristics of multi-send HVDC system and its impact on protection[C] // The 6th International Conference on Advance Power System Automation and Protection, 2015: 90-95.
- [22] 姚旭, 何方明, 索南加乐, 等. 工频变化量距离元件一些问题的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 78-83.
YAO Xu, HE Fangming, SUONAN Jiale, et al. Some discussion on the fault component distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 78-83.
- [23] 索南加乐, 何方明, 焦在滨, 等. 工频变化量距离元件特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 59-65.
SUONAN Jiale, HE Fangming, JIAO Zaibin, et al. Research on the characteristics of distance element based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 59-65.
- [24] 徐妍, 陆广香, 徐晓敏, 等. 关于工频变化量距离保护可靠性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 51-57.
XU Yan, LU Guangxiang, XU Xiaomin, et al. Research on the reliability of the distance protection using power frequency variable components[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 51-57.
- [25] 雷霖, 赖真良, 朱家龙, 等. 工频变化量距离继电器耐受过渡电阻性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 26-33.
LEI Lin, LAI Zhenliang, ZHU Jialong, et al. Performance analysis of endure transition resistance of distance relay based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 26-33.
- [26] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

收稿日期: 2018-05-16; 修回日期: 2018-08-20

作者简介:

蔡东晓(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流系统故障分析; E-mail: cdx.scut@foxmail.com

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

(编辑 姜新丽)