

多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究

项 玲, 郑建勇, 胡敏强

(东南大学电气工程系, 江苏省南京市 210096)

摘要: 借鉴两端直流系统中换相失败的研究结果和熄弧角公式, 运用数学和电路基本理论, 推导常规控制方式下多端直流(MTDC)系统和多馈入直流(MIDC)系统的熄弧角模型, 分析影响换相失败的各种因素, 阐述复杂直流输电系统中发生换相失败的一般规律: MTDC 系统中, 定电压控制的逆变站的参数会对系统中所有逆变站的换相失败产生影响; 受影响的逆变站由于自身运行参数、控制方式的变化, 可能形成复杂的换相失败故障及故障恢复过程; MIDC 系统中, 一个逆变站的换相失败除了受自身参数的影响, 还受与之相耦合的其他逆变站参数的影响。

关键词: 两端直流输电系统; 多端直流输电系统; 多馈入直流输电系统; 换相失败

中图分类号: TM721.1

0 引言

迄今为止, 国内所建的高压直流输电工程都是点对点的两端直流输电系统, 即一个送端和一个受端。三峡电力系统的建成, 龙泉—政平直流线路落点于华东电网, 使得一个多馈入直流(MIDC)输电系统的格局已在我国华东和华中电网出现^[1]。随着直流输电技术的成熟, 许多两端直流输电系统将逐步演变成多端直流(MTDC)输电系统。但多端或多馈入直流输电系统的形成也带来一些特殊问题。诸如, 一个逆变站换相失败可能会影响整个系统, 或者一个逆变站换相失败后, 可能受其他换流站的影响而难以恢复。逆变器换相失败的研究已有成熟的结论^[2]: 逆变器熄弧角 γ 小于阀固有极限熄弧角 $\gamma_{\min}$, 是换相失败发生的本质; 在两端直流输电系统中, 由于逆变器采用定熄弧角(CEA)控制, 因此由交流系统故障导致电压幅值跌落和电压相角偏移以及直流电流上升是导致换相失败的根本原因^[3]。本文对多端或多馈入直流输电系统换相失败进行了研究。

1 MTDC 输电系统的换相失败问题

MTDC 输电系统即直流联络线上有 2 个以上受端或送端的直流输电系统, 充分发挥了直流输电技术的经济优点和技术优点, 因此它比两端直流输电系统更具吸引力。

1.1 系统模型

根据设计和运行经验, 恒电压的辐射状并联 MTDC 输电系统成为研究和应用的重点。本文使用的辐射状并联 MTDC 输电系统模型由 CIGRE

HVDC 标准模型搭建而成, 见图 1。整流站采用定电流(CC)控制, 逆变站 1 采用定电压(CV)控制决定直流电压 U_{d1} , 其余逆变站采用 CEA 控制。各逆变站所连交流系统之间的电气距离较远。

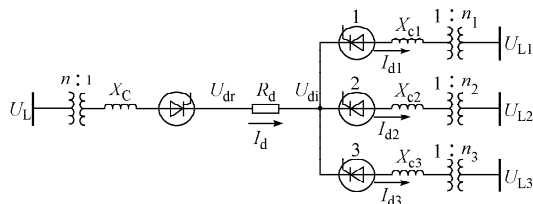


图 1 辐射状并联 MTDC 系统模型
Fig. 1 Radialized parallel MTDC system model

1.2 熄弧角模型

交流系统对称时, CV 控制逆变站的熄弧角为^[2]:

$$\gamma_1 = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}n_1 X_{c1} I_{d1}}{U_{L1}} + \cos \beta_1\right) \quad (1)$$

CEA 控制逆变站(以逆变站 2 为例), 其直流电压满足 $U_{d2} = U_{d1} = U_{di}$, 因此其熄弧角为:

$$\gamma_2 = \arccos\left[\frac{n_1 X_{c1} I_{d1} + n_1 X_{c2} I_{d2} + \sqrt{2}U_{L1} \cos \beta_1 \frac{n_2}{n_1}}{\sqrt{2}U_{L2}}\right] \quad (2)$$

交流系统不对称时, 换流母线故障相电压下降 ΔU , CV 控制逆变站的熄弧角为^[2]:

$$\gamma_1 = \arccos\left[\sqrt{2}n_1 X_{c1} I_{d1} \left[U_{L1} \frac{\sqrt{3-3\Delta U_1 + \Delta U_1^2}}{\sqrt{3}}\right]^{-1} + \cos \beta_1\right] - \arctan \frac{\Delta U_1}{\sqrt{3}(2 - \Delta U_1)} \quad (3)$$

CEA 控制逆变站的最小熄弧角为:

$$\gamma_2 = \arccos \left[\left(n_1 X_{c1} I_{d1} + n_1 X_{c2} I_{d2} + \sqrt{2} U_{L1} \frac{\sqrt{3 - 3\Delta U_1 + \Delta U_1^2}}{\sqrt{3}} \cos \beta_1 \right) \cdot \left(\sqrt{2} U_{L2} \frac{\sqrt{3 - 3\Delta U_2 + \Delta U_2^2}}{\sqrt{3}} \right)^{-1} \frac{n_2}{n_1} \right] - \arctan \frac{\Delta U_2}{\sqrt{3}(2 - \Delta U_2)} \quad (4)$$

由式(1)、式(2)可见,各逆变站的交流系统均对称时,换流母线电压、直流电流等因素仍然影响换相失败。而由式(3)、式(4)可见,交流系统不对称时,熄弧角还与换相线电压过零点相位移角度有关。与两端系统不同的是,各逆变站熄弧角之间不是相互独立的,CEA 控制逆变站的熄弧角还要受 CV 控制逆变站的影响。

以图 1 模型为例,分析影响 MTDC 系统换相失败的各种因素。系统额定参数为: $\beta_1 = 39^\circ$, $X_{c1} = X_{c2} = X_{c3}$, $I_{d1} = I_{d2} = I_{d3} = 1.0$ (2 kA), $n_1 = n_2 = n_3 = 1.0$, $U_{L1} = U_{L2} = U_{L3} = 1.0$ (230 kV), 关断裕度角 $\gamma_0 = 16.9^\circ$, 阀固有极限熄弧角 $\gamma_{\min} = 10^\circ$ 。

1.3 换流母线电压的影响

其余参数保持额定值不变时, γ_1, γ_2 随 U_{L1} 和 U_{L2} 变化曲线见图 2。 U_{L1} 影响所有逆变站的熄弧角。 U_{L1} 下降导致 γ_1 减小, γ_2 和 γ_3 均增大; U_{L2} 下降只会导致 γ_2 减小。

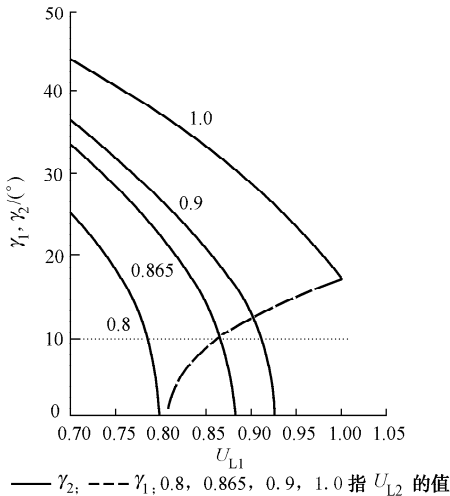


图 2 γ_1, γ_2 随 U_{L1} 和 U_{L2} 变化曲线
Fig. 2 Waveform of extinct-angles varied with AC bus voltage

若 $U_{L2} > 0.972$, U_{L1} 下降只有逆变站 1 发生换相失败, 而逆变站 2 不会发生同样的故障。若 0.865

$< U_{L2} < 0.927$, $U_{L1} = 1.0$ 时 $\gamma_2 < 10^\circ$, 额定参数下逆变站 2 发生换相失败的 U_{L2} 临界值从 0.865 升至 0.927; U_{L1} 继续下降, 出现所有逆变站能够同时从换相失败中恢复的 U_{L1} 电压区间。若 $U_{L2} < 0.865$, U_{L1} 下降会导致所有逆变站同时发生换相失败; 若 U_{L2} 下降剧烈, 会出现重复换相失败。

1.4 直流电流的影响

直流电流 I_d 由整流站控制, 不受逆变站影响, 满足 $I_d = I_{d1} + I_{d2} + I_{d3}$ 。 I_{d1} 增大, 所有逆变站的熄弧角均减小; I_{d1} 一定时, I_{d2} 增大, γ_2 减小, γ_3 增大。如图 3 所示, I_{d1} 增大, 逆变站 2 换相失败的 I_{d2} 临界值减小, 而逆变站 3 换相失败的 I_{d3} 临界值增大。因此, I_{d1} 增加不利于逆变站 3 换相失败故障的恢复, 可能形成重复故障; 相反, I_{d1} 减小也不利于逆变站 2 换相失败故障的恢复。

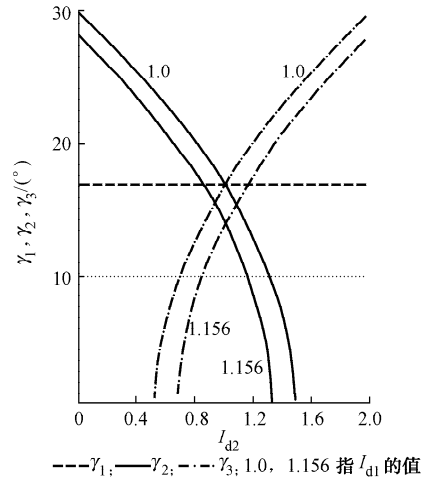


图 3 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 随 I_{d1} 和 I_{d2} 变化曲线
Fig. 3 Waveform of extinct-angles varied with DC current

1.5 交流系统不对称故障的影响

交流系统不对称时, 由图 4 看出, ΔU_1 增加导致 γ_1 减小, γ_2 增大, 当 ΔU_1 一定时, ΔU_2 增加会导致 γ_2 下降。 CV 控制逆变站的交流系统不对称故障对其他逆变站存在不利影响。

若 $\Delta U_1 < 0.052$, 逆变站 2 不会发生换相失败; 若 $0.052 < \Delta U_2 < 0.175$, $\Delta U_1 = 0.175$ ($\gamma_1 = 10^\circ$) 时, 逆变站 1 和 2 能够同时从换相失败中恢复过来。若 $\Delta U_2 > 0.175$, 交流系统故障恢复过程中, 逆变站 1 和 2 会同时发生换相失败, 并且难以自行恢复。

1.6 其他因素的影响

逆变站换流变的变比、换相等值阻抗都是系统设计规划阶段参数, 换相暂态过程中不会发生变化, 合理设计这些参数有利于避免换相失败的发生。

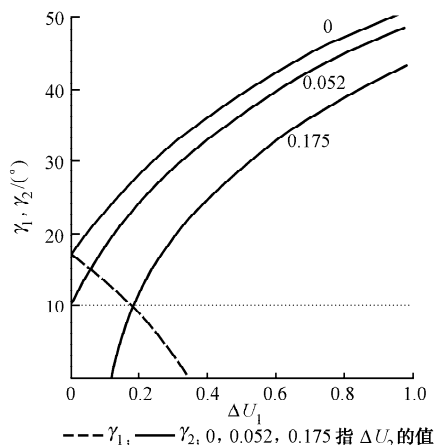


图4 γ_1, γ_2 随 ΔU_1 和 ΔU_2 变化曲线
Fig. 4 Waveform of extinct-angles during AC system asymmetry fault

以逆变站1和逆变站2为例:减小 n_1 提高了 γ_1 的静态值,但会加重逆变站1对逆变站2的干扰,增加系统同时换相失败的概率。逆变站1和2的交流系统都发生不对称故障时,逆变站2换相失败的 ΔU_1 临界值随 n_1 减小而减小。因此,减小 n_1 对逆变站2不利,可以通过减小 n_2 来削弱 n_1 给逆变站2造成的不利影响。 X_{c1} 增加会使 γ_1 和 γ_2 的静态值均减小,而 X_{c2} 增加只会减小 γ_2 。合理设计 X_{c2} 以削弱 X_{c1} 造成的不利影响。额定参数下,仅 X_{c1} 增加15.6%时, $\gamma_1 = 10^\circ$, $\gamma_2 = 13.89^\circ$;若 X_{c1} 增加31.2%,则 $\gamma_2 = 10^\circ$, X_{c2}, X_{c3} 降低31.2%, γ_2 又恢复到 γ_0 。

CV控制逆变站的 β_1 会影响所有熄弧角。其余参数保持额定状态不变时, β_1 增加 1° , 所有熄弧角均增加 2° , 但是增大 β_1 不仅会减少直流系统传输的功率,增大系统的无功损耗,而且在 MTDC 系统中还会令直流电压不稳定,影响到其他逆变站的正常工作,降低系统的经济性。

2 MIDC 输电系统的换相失败问题

落点于同一个交流系统的多个直流输电系统构成 MIDC 系统。对于 MIDC 系统,由于交流间存在复杂的相互作用,除了考虑交流电压、交流电压相角和直流电流等因素的影响,还需考虑各直流输电系统之间的不良相互作用对换相失败的影响。

2.1 系统模型

三馈入直流输电系统(见图5)由3个 CIGRE HVDC 标准模型组成,逆变器接于同侧,相邻交流换流母线用耦合阻抗连接,直流系统彼此独立。整流站采用 CC 控制,逆变站均采用 CEA 控制。

2.2 熄弧角模型

对每个独立的子系统仍可沿用两端直流输电系

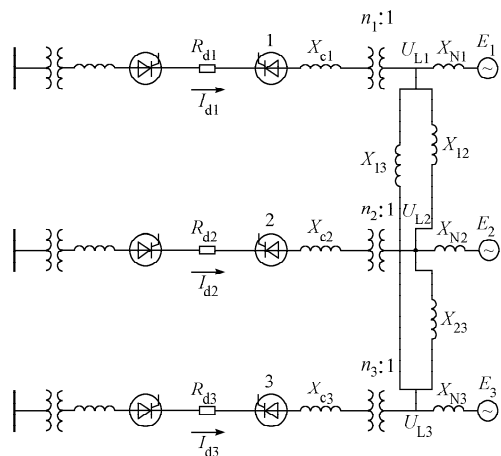


图5 三馈入直流输电系统模型
Fig. 5 Three-infeed HVDC system

统已有的结论和公式。以逆变站1为例,熄弧角为^[2]:

$$\gamma_1 = \arccos \left(\frac{\sqrt{2}n_1 I_{d1} X_1}{U_{L1}} + \cos \beta_1 \right) \quad (5)$$

式中: $X_1 = X_{N1}/(2n_1) + X_{c1}$, 为交流系统阻抗和换流阻抗归算到换流变阀侧后的等值换相阻抗。

由于 MIDC 系统的逆变站所连交流系统之间相互耦合,逆变站1的 U_{L1} 受多个交流系统共同作用:

$$U_{L1} = \left(\frac{E_1}{X_{N1}} + \frac{U_{L2}}{X_{12}} + \frac{U_{L3}}{X_{13}} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d1} \right) \cdot \left(\frac{1}{X_{N1}} + \frac{1}{X_{12}} + \frac{1}{X_{13}} \right)^{-1} \quad (6)$$

式(5)可改写为:

$$\gamma_1 = \arccos \left[\sqrt{2}n_1 I_{d1} X_1 \left(\frac{1}{X_{N1}} + \frac{1}{X_{12}} + \frac{1}{X_{13}} \right) \cdot \left(\frac{E_1}{X_{N1}} + \frac{U_{L2}}{X_{12}} + \frac{U_{L3}}{X_{13}} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d1} \right)^{-1} + \cos \beta_1 \right] \quad (7)$$

若各逆变站的交流系统均不对称,则有:

$$\gamma_1 = \arccos \left\{ \frac{\sqrt{2}n_1 I_{d1} X_1}{U_{L1}'} (1 - \Delta U_1' + \frac{1}{3} (\Delta U_1')^2)^{-\frac{1}{2}} + \cos \beta_1 \right\} - \arctan \frac{\Delta U_1'}{\sqrt{3}(2 - \Delta U_1')} \quad (8)$$

$$U_{L1}' = \left(\frac{E_1}{X_{N1}} + \sqrt{1 - \Delta U_2 + \frac{1}{3} \Delta U_2^2} \frac{U_{L2}}{X_{12}} + \sqrt{1 - \Delta U_3 + \frac{1}{3} \Delta U_3^2} \frac{U_{L3}}{X_{13}} \right) \left(\frac{1}{X_{N1}} + \frac{1}{X_{12}} + \frac{1}{X_{13}} \right)^{-1} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d1} \left(\frac{1}{X_{N1}} + \frac{1}{X_{12}} + \frac{1}{X_{13}} \right)^{-1} \quad (9)$$

式(8)、式(9)反映逆变站2和逆变站3交流不对称

对 U_{L1} 的影响。式(8)中 $\Delta U_1' = \Delta U_1 U_{L1} / U_{L1}'$, 表示将 U_{L1} 单相电压跌落值 ΔU_1 归算至以 U_{L1}' 为基准电压下的标么值。

由式(7)可见, 逆变站 1 的交流系统对称时, 系统等值电势 E_1 、直流电流等因素仍然会影响换相失败。此外, U_{L2} 、 U_{L3} 、系统 1 和系统 2 的耦合阻抗 X_{12} 、系统 1 和系统 3 的耦合阻抗 X_{13} 也会影响 γ_1 。而由式(8)可见, 交流系统不对称时, 熄弧角除了与系统 1 的换相线电压过零点相角位移有关, 还与相耦合的逆变站交流系统不对称故障有关。可见, MIDC 系统中, 影响熄弧角的因素非常复杂。

以图 5 模型为例, 分析影响 MTDC 系统换相失败的各种因素。系统额定参数为: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 39^\circ$, $E_1 = 0.98$, $X_{c1} = X_{c2} = X_{c3}$, $X_{N1} = 0.01$, $I_{d1} = I_{d2} = I_{d3} = 1.0$ (2 kA), $n_1 = n_2 = n_3 = 1.0$, $U_{L2} = U_{L3} = 1.0$ (230 kV), $X_{12} = X_{13} = X_{23} = 0.01$, 关断裕度角 $\gamma_0 = 15.7^\circ$, 阀固有极限熄弧角 $\gamma_{\min} = 10^\circ$ 。

2.3 换流母线线电压的影响

E_1 下降导致 γ_1 减小, 同时 U_{L2} 、 U_{L3} 对 E_1 产生干扰, 加剧 γ_1 减小。观察图 6 发现, 其余参数保持额定状态不变, 若 $U_{L3} = 0.899$, $U_{L2} = 0.852$, $E_1 = 1.0$ 时, γ_1 已经小于 10° ; 而 $U_{L3} = 1.0$, $U_{L2} = 0.85$, $E_1 = 0.855$ 时, γ_1 才小于 10° 。

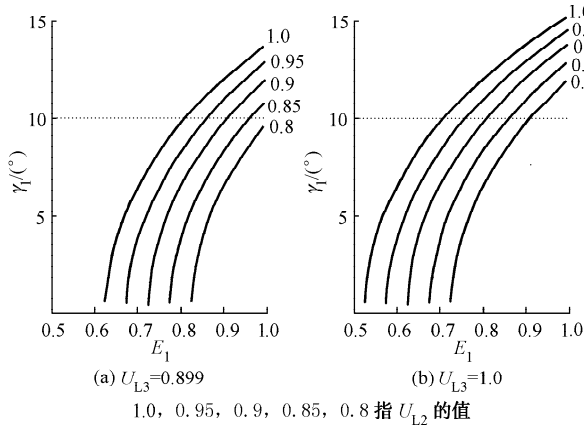


图 6 γ_1 随 E_1 , U_{L2} , U_{L3} 的变化曲线

Fig. 6 Waveform of extinct-angle varied with AC bus voltage

2.4 直流电流的影响

常用的 MIDC 系统直流部分相互独立, 虽然物理邻近的直流线路之间存在某些电磁耦合, 但是换流器交流系统之间的紧密联系才是系统内部主要的相互作用力。直流电流 I_{d1} 由整流站控制, I_{d1} 增加导致 γ_1 减小。其余参数保持额定状态, MIDC 系统中 $I_{d1} = 1.093$ 时 $\gamma_1 = 10^\circ$; 而两端直流输电系统中 $I_{d1} = 1.156$ 时 $\gamma_1 = 10^\circ$, 由于交流系统阻抗, 直流电流增

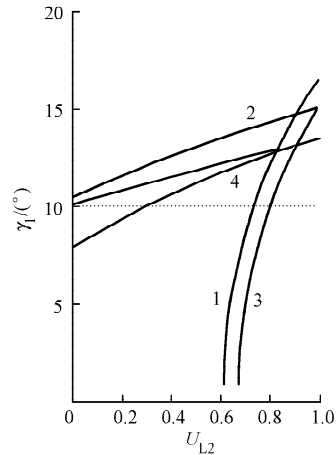
加会提高发生换相失败的概率。

2.5 交流系统不对称故障的影响

逆变站 2 和逆变站 3 交流对称, $\Delta U_1 = 0.139$ 时, $\gamma_1 = 10^\circ$ 。若仅逆变站 2 交流系统不对称 ($\Delta U_2 = 0.1$), 当 $\Delta U_1 = 0.117$ 时 $\gamma_1 = 10^\circ$; 若 $\Delta U_2 = 0.05$, 当 $\Delta U_1 = 0.128$ 时 $\gamma_1 = 10^\circ$ 。若逆变站 2 和逆变站 3 的交流系统都不对称 ($\Delta U_2 = \Delta U_3 = 0.1$), 当 $\Delta U_1 = 0.096$ 时 $\gamma_1 = 10^\circ$ 。逆变站 2 和逆变站 3 的交流不对称会导致 U_{L1} 下降, 因此 $\Delta U_1' > U_1$, 相当于加剧逆变站 1 的不对称故障。所以, 逆变站 2 和逆变站 3 的交流系统不对称会提升逆变站 1 因自身交流系统不对称而发生换相失败的概率。

2.6 交流系统强度及交流系统之间耦合度的影响

比较图 7 中的曲线 1 和 3 可见, 强交流系统下, U_{L1} 受 E_1 的影响强, 受 U_{L2} 和 U_{L3} 的影响弱, 说明强交流系统能够对所连接的子系统“屏蔽”。相反, 弱交流系统下, U_{L1} 容易受 U_{L2} 和 U_{L3} 的影响。



曲线 1: $X_{N1}=0.001$, $X_{L12}=0.001$; 曲线 2: $X_{N1}=0.001$, $X_{L12}=0.1$;
曲线 3: $X_{N1}=0.01$, $X_{L12}=0.001$; 曲线 4: $X_{N1}=0.01$, $X_{L12}=0.1$

图 7 γ_1 随 X_{N1} , X_{L12} , U_{L2} 的变化曲线

Fig. 7 Waveform of extinct-angle varied with impedance, coupling impedance and AC bus voltage

逆变站通过交流系统的耦合阻抗实现相互作用, 因此耦合阻抗也会影响换相失败。文献[4,5]对逆变站 i 和 j 做如下定义。

弱耦合临界阻抗 X_{ij}^{wc} : 系统参数保持不变, 仅 U_{Li} 下降, 当 U_{Li} 达到最小临界电压值 (系统保护未动作时允许的最小电压值), 使 $\gamma_j = \gamma_{\min}$ 时的 X_{ij} 取值。因此, 当 $X_{ij} > X_{ij}^{wc}$ 时, U_{Li} 下降不会导致逆变站 j 换相失败。图 5 模型中, 取 U_{L2} 最小临界值 0.6, $X_{ij}^{wc} = 0.012$ 。图 7 中曲线 2 和 4 满足 $X_{12} > X_{12}^{wc}$, 因此 U_{L2} 下降不会导致逆变站 1 换相失败。

强耦合临界阻抗 X_{ij}^{sc} : 系统参数保持不变, 仅

U_{Li} 下降,当 U_{Li} 达到令 $\gamma_i = \gamma_{\min}$ 的临界电压值,使得 $\gamma_j = \gamma_{\min}$ 时的 X_{ij} 取值。因此,当 $X_{ij} < X_{ij}^{\text{sc}}$ 时, U_{Li} 下降导致逆变站 i 和 j 同时换相失败,故障能够同时恢复。

图7中曲线1和曲线3,耦合阻抗介于 X^{wc} 和 X^{sc} 之间,逆变站会互相引发换相失败,并且故障恢复过程复杂。

X^{wc} 和 X^{sc} 是用于判别系统换相失败故障类型的虚拟参考值,同时受到各种参数的影响,如 X_{N1} , X_{13} , I_{d1} , β_1 等,因此对不同的系统运行状态需要具体分析和计算。

3 结论

本文根据文献[2]推导出MTDC系统和MIDC系统的熄弧角数学模型。运用数学方法分析各种参数对换相失败的影响规律:

1) MTDC系统中, CV控制逆变站的换流母线电压、直流电流以及交流不对称不仅导致其自身换相失败,而且会影响CEA控制的逆变站,扩大故障范围,或者形成复杂的故障恢复过程。

2) MTDC系统中,合理设计CEA控制逆变站系统参数以削弱CV控制逆变站的影响。

3) MIDC系统中,逆变站的换相失败受自身参数的影响,还受与之耦合的逆变站影响。

4) MIDC系统中,逆变站耦合的交流系统间会相互干扰,对换相失败的影响随交流系统强度、交流系统耦合阻抗的变化而变化。强交流系统能够“屏蔽”逆变站。

5) 对MIDC系统,文献[4,5]定义 X^{wc} 和 X^{sc} ,分析换相失败发生规律:当耦合阻抗大于 X^{wc} 时,耦合的逆变站间不会相互引发换相失败;当耦合阻抗小

于 X^{sc} 时,耦合的逆变站会同时换相失败,并同时恢复;当耦合阻抗介于 X^{wc} 和 X^{sc} 之间时,逆变站之间会互相引发换相失败故障,但故障恢复过程复杂。

参考文献

- [1] 杨卫东,徐政,韩祯祥.多馈入交直流电力系统研究中的相关问题.电网技术,2000,24(8):13—17.
YANG Wei-dong, XU Zheng, HAN Zhen-xiang. Special Issues and Suggestions on Multi-infeed AC/DC Power Systems. Power System Technology, 2000, 24(8): 13—17.
- [2] 欧开健,任震,荆勇.直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析.电力自动化设备,2003,23(5):5—8.
OU Kai-jian, REN Zhen, JING Yong. Research on Commutation Failure in HVDC Transmission System Part 1: Commutation Failure Factors Analysis. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5—8.
- [3] ZHANG Li-dong, DOFNAS L. A Novel Method to Mitigate Commutation Failures in HVDC Systems. ABB Technology Papers, 2002.
- [4] 杨卫东.多馈入直流输电系统的控制策略研究:[博士学位论文].杭州:浙江大学,2001.
YANG Wei-dong. Research on Control Strategies for Multi-infeed HVDC Systems, Doctoral Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [5] DENIS L H A, ANDERSSON G. Voltage Stability Analysis of Multi-feed HVDC Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309—1318.

项玲(1980—),女,博士研究生,研究方向为直流输电系统故障与仿真。E-mail: erica_xiang@yahoo.com.cn

郑建勇(1966—),男,教授,系副主任,从事电力电子方面的研究。

胡敏强(1961—),男,校长助理,教授,博士生导师,从事工程电磁场计算、电机及其控制技术、电气主设备状态监测与故障诊断等方面的研究。

Study on Commutation Failure in MTDC and MIDC Systems

XIANG Ling, ZHENG Jian-yong, HU Min-qiang

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the conclusions of commutation failure in HVDC system and extinct-angle formulas of HVDC, this paper deduces extinct-angle formulas of MTDC and MIDC systems in normal control and analyzes the principal factors that might lead to commutation failure. General rules are expatiated. In MTDC system, parameters of certain voltage-controlled inverter may affect all inverters and result in complicated fault and recovery process due to the variety of their running parameters and control modes. In MIDC system, not only parameters of coupling inverters but also self-parameters of inverter may lead it to complicated commutation failure.

Key words: HVDC; multi-terminal HVDC (MTDC); multi-infeed HVDC (MIDC); commutation failure