

电容换相逆变器换相失败的研究

项 玲, 胡敏强, 郑建勇

(东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 换相失败是直流输电系统的常见故障之一, 研究逆变器的熄弧角对理解换相失败的本质及设计保护措施具有重要意义。详细描述传统逆变器熄弧角、电容换相逆变器的视在熄弧角和实际熄弧角的概念和数学模型, 比较、分析三者之间的区别与联系。根据熄弧角的数学模型推导实际熄弧角的数学模型, 分析影响电容换相逆变器换相失败的主要因素以及影响规律: 电容换相逆变器在直流电流下降和交流母线电压升高时, 实际熄弧角均减小, 可能导致换相失败; 换相电容设计值过大, 静态换相裕度较小; 交流系统不对称会恶化电容换相逆变器的换相性能, 甚至导致换相失败。

关键词: 电容换相逆变器; 换相失败; 视在熄弧角; 实际熄弧角

中图分类号: TM 464; TM 721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)10-0056-03

电容换相逆变器 CCI (Capacitor Commutated Inverter) 是在常规逆变器和换流变压器之间串联电容而构成的。该电容器向逆变器提供交流换相电压, 因此称为换相电容 CC (Commutation Capacitor)^[1]。

由于换相电容的作用, CCI 的换相电压是交流母线电压和换相电容上附加电压之和, 这使得其动态稳定性比常规逆变器的更好, 因此 CCI 非常适合与长距离的电缆传输线、弱交流系统相连接^[2]。

现根据已有文献内容描述传统逆变器熄弧角、CCI 的视在熄弧角^[3]和实际熄弧角^[4]的概念和数学模型, 比较分析三者间的区别与联系。根据熄弧角的数学模型推导实际熄弧角的数学模型。根据数学模型分析影响 CCI 换相失败的各种因素及影响规律。

1 熄弧角模型

1.1 熄弧角

传统逆变器的熄弧角 γ ^[5] 是指从阀关断 (阀中电流为零) 的时刻起至阀上电压 (即交流母线电压) 由负变正过零点时刻为止的这段时间, 其满足 $\gamma = \beta - \mu$, 其中 β 为越前触发角, μ 为换相角。

1.2 视在熄弧角

CCI 的视在熄弧角 γ_{app} 与熄弧角 γ 概念等价, 仅反映阀关断时刻起至换流母线电压由负变正过零点时刻止的这段时间, 因此亦满足:

$$\gamma_{app} = \beta - \mu \quad (1)$$

1.3 实际熄弧角

根据 CCI 换相原理可知, 由于换相电容上附加电压的影响, 使得换相电压比交流母线电压滞后一个角度 δ , 并且满足 $\delta = \beta + \mu + \gamma'$ 。据此, 定义 CCI 的实际熄弧角^[4]:

$$\gamma_{real} = \delta - \beta - \mu = \beta' - \mu, \quad \beta' = \delta - \beta \quad (2)$$

实际熄弧角反映的是自阀关断时刻 ($\omega t = \alpha + \mu$) 开始、阀上反向压降降为零时刻 ($\omega t = \alpha + \mu + \gamma'$) 结束的一段时间。

传统逆变器中, 换相的阀上反向压降仅为交流母线电压; 但是 CCI 中, 则为交流母线电压与电容附加电压之和。由此可见, 视在熄弧角和实际熄弧角是截然不同的概念: 视在熄弧角仅与逆变器交流母线电压由负至正的过零点有关, 因此, 其值不能反映逆变器的换相失败特性, 仅在定义上与 γ 等价; 而只有实际熄弧角才与实际换相电压有关, 能够真正反映换相失败的特性, 这在功能上与 γ 等价。

1.4 实际熄弧角的数学模型

根据上述分析得到, 研究 CCI 换相失败故障时应当关注实际熄弧角。因此, 根据熄弧角的数学模型^[6], 推导实际熄弧角的表达式。

逆变侧交流系统对称时:

$$\gamma_{real} = \arccos \left[\frac{\sqrt{2} I_{dc} X_c}{U_1 / k + U_{cc}} + \cos(\delta - \beta) \right] \quad (3)$$

逆变侧交流系统不对称时:

$$\gamma_{real} = \arccos \left[\frac{\sqrt{2} I_{dc} X_c}{U_1' / k + U_{cc}} + \cos(\delta - \beta) \right] - \phi \quad (4)$$

式中 X_c 为换相电抗, 近似等于换流变的漏抗; I_{dc} 为直流电流; U_1 为交流母线电压的有效值; U_1' 为不对称时的交流母线电压有效值, 满足 $U_1' = U_1 \sqrt{1 - \Delta U + \Delta U^2 / 3}$, ΔU 为不对称相的相电压跌落标么值; U_{cc} 为换相电容电压的有效值, 满足 $U_{cc} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{I_{dc}}{X_{cc}}$, 其中 X_{cc} 为换相电容电抗; k 为换流变变比; $\delta = \arctan U_{cc} / U_1$; ϕ 为交流系统不对称引起的换相线电压过零点前移角度, 满足 $\phi = \arctan \frac{\Delta U}{\sqrt{3} (2 - \Delta U)}$ 。

由式(4)可见, I_{dc} 、 β 、 U_1 、 k 、 X_{cc} 、 X_c 及交流系统不对称,都会影响实际熄弧角,从而导致换相失败。这里着重讨论 I_{dc} 、 U_1 、 X_{cc} 、 β 及交流系统不对称的影响。

2 影响因素

以文献[7-8]中采用的典型电容换相逆变器为仿真计算的模型。

2.1 直流电流

根据式(2)从理论角度分析得到:保持 β 不变时,若 I_{dc} 减小会导致换相电容上的附加电压降低,引起 δ 减小(μ 的变化不大), γ_{real} 将随之减小。保持 δ 不变时,若 β 增大(μ 的变化不大), γ_{real} 随之减小。

根据式(4)运用 MathCAD 进行数值计算,得到 γ 、 γ_{real} 随 I_{dc} 、 β 变化的曲线,如图 1 所示(选取发生换相失败的临界熄弧角 $\gamma_{min}=10^\circ$;下同)。由图可见,当 I_{dc} 减小时, γ_{real} 随之减小,而 γ 却增加;当 I_{dc} 一定时, β 增大, γ_{real} 随之减小,而 γ 增大。

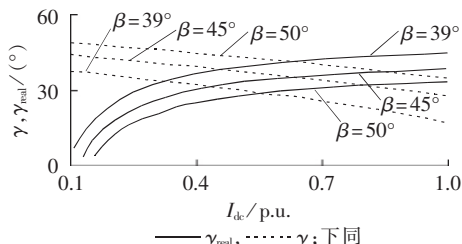


图 1 γ_{real} 和 γ 随 I_{dc} 、 β 的变化曲线

Fig.1 Curves of γ_{real} and γ vs. I_{dc} for different β s

因此, I_{dc} 对电容换相逆变器的影响趋势与传统逆变器正好相反:

a. 对于传统逆变器,当 I_{dc} 升高时,会发生换相失败^[6,9],例如当 $\beta=39^\circ$ 时, I_{dc} 上升至 1.15 p.u., γ 下降到 10° ,换相失败将发生;

b. 对于电容换相逆变器, I_{dc} 升高时,不会发生换相失败,而 I_{dc} 降低时,可能发生换相失败,并且随着 β 的增大发生换相失败的几率也增加。

2.2 换流母线电压

根据式(2)从理论角度分析得到:保持 β 不变时,若 U_1 增大,而换相电容上的附加电压保持不变,则 δ 将减小(μ 的变化不大), γ_{real} 将随之减小。保持 δ 不变时,若 β 增大(μ 的变化不大), γ_{real} 亦减小。

根据式(4)运用 MathCAD 进行数值计算,得到 γ 、 γ_{real} 随 U_1 、 β 变化的曲线,如图 2 所示。由图可见,当 U_1 增大时, γ_{real} 随之减小,而 γ 却随之增加;当 U_1 一定时, β 增大, γ_{real} 随之减小,而 γ 增大。

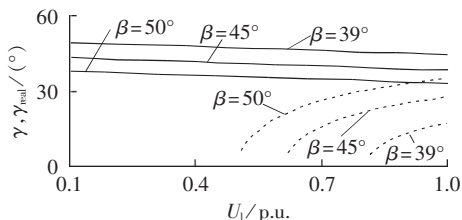


图 2 γ_{real} 和 γ 随 U_1 、 β 的变化曲线

Fig.2 Curves of γ_{real} and γ vs. U_1 for different β s

U_1 对电容换相逆变器的影响趋势与传统逆变器也相反:

a. 对于传统逆变器, U_1 下降时,会发生换相失败^[6,9],例如当 $\beta=39^\circ$ 时, U_1 下降至 0.87 p.u., γ 下降到 10° ,将发生换相失败;

b. 对于电容换相逆变器, U_1 下降时,不会发生换相失败,而 U_1 升高时,电容换相逆变器可能发生换相失败,并且随着 β 的增大发生换相失败的几率也增加,由于 U_1 仅为电容换相变换相电压的一部分,因此 γ_{real} 受其影响而产生的变化幅度相对 γ 要小。

2.3 换相电容

根据式(2)从理论角度分析得到:保持 β 不变时,若换相电容的阻抗增加,则换相电容上的附加电压随之增大,相位后移角度 δ 将增大(而 μ 的变化不大), γ_{real} 将随之减小。保持 δ 不变时,若 β 增大(而 μ 的变化不大), γ_{real} 亦随之减小。

根据式(4)运用 MathCAD 进行数值计算,得到 γ_{real} 随换相电容 C_{cc} (不同 β 取值)的变化曲线,如图 3 所示。由图可见,当 C_{cc} 减小时,即 X_{cc} 增大时, γ_{real} 随之增大;当 C_{cc} 也即 X_{cc} 一定时, γ_{real} 随 β 的增大而减小。

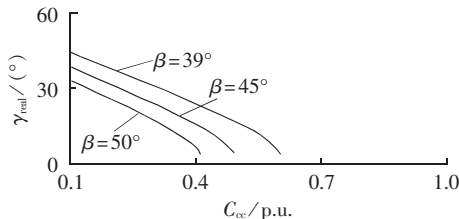


图 3 γ_{real} 随 C_{cc} 、 β 的变化曲线

Fig.3 Curves of γ_{real} vs. C_{cc} for different β s

引入补偿度的概念^[10]:

$$k = \sqrt{\frac{X_{cc}}{X_L}} = \frac{1}{\omega} \frac{1}{\sqrt{LC_{cc}}}$$

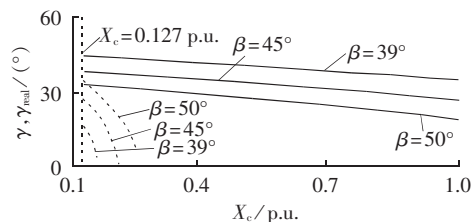
文献[10]表明:补偿度增大时,有利于防止换相失败的发生,但是会导致换流器吸收的无功功率增加,导致逆变器基波功率因数降低。因此当采用整流侧定电流、逆变侧定电压控制方式时,补偿度不是越大越好,如果过大可能会使得换流器的功率因数下降过多,导致 HVDC 系统的运行经济性变差。

但是对于一个给定的电容换相换流器 CCC (Capacitor Commutated Converter) 直流输电工程,其换相电容在设计初期就确定了,运行过程中是静态值,不会发生变化。因此在设计换相电容时,需要保证适当的静态换相裕度。如果换相电容设计值过大,静态换相裕度较小,则由于直流电流下降或者换流母线电压上升而引起换相失败的几率将增大。

此外,换相电容还有一个作用,可以看成 X_{cc} 的存在相对削弱了 X_c 对 γ_{real} 的影响。当 I_{dc} 和 U_1 恒定时,对于确定的 β ,换相电抗 X_c 越大, γ 越小。从图 4 可以看出, X_c 增大, γ_{real} 和 γ 均减小;当 X_c 一定时, γ_{real} 随 β 的增大而减小,而 γ 却随 β 的减小而减小。

2.4 交流系统不对称

交流系统不对称时,导致交流母线电压过零点

图 4 γ_{real} 和 γ 随 X_c 、 β 的变化曲线Fig.4 Curves of γ_{real} and γ vs. X_c for different β s

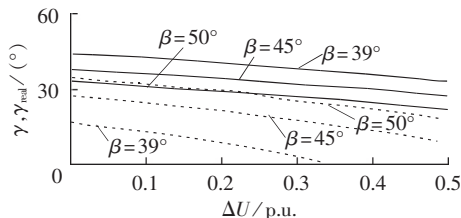
位移 ϕ 和幅值跌落^[6]。因此,交流系统不对称时的熄弧角满足:

$$\gamma'_{\text{real}} = \delta - \phi - \beta - \mu = \beta'' - \mu \quad (5)$$

显然 $\gamma'_{\text{real}} < \gamma_{\text{real}}$ 。

交流系统不对称,一方面,保持换相电容附加电压不变,换流母线线电压的降低将引起 δ 增大, γ_{real} 增大;另一方面,过零点位移直接导致 γ_{real} 降低。因此交流系统不对称对换相失败的影响比较复杂。

根据式(4)运用 MathCAD 得到,交流系统不对称时, γ_{real} 随单相电压跌落值 ΔU 、 β 的变化曲线如图 5 所示。交流系统不对称对 γ_{real} 和 γ 的影响趋势一致:导致 γ_{real} 和 γ 减小,并且随着电压跌落的加剧而恶化换相性能,导致换相失败。

图 5 γ_{real} 和 γ 随 ΔU 、 β 的变化曲线Fig.5 Curves of γ_{real} and γ vs. ΔU for different β s

2.5 越前触发角

I_{dc} 、 U_1 和 X_{cc} 等值保持不变时,理论分析和数值计算均表明: γ_{real} 随 β 的增大而减小。对于传统逆变器,通过增大 β 的整定值来避免换相失败是以降低直流输电系统运行经济性为代价的^[6]。但是,对于 CCI,较小的 β 整定值不仅保证运行经济性,而且有利于避免换相失败^[11]。

3 结论

详细描述了 CCI 的 γ_{app} 和 γ_{real} 的概念、数学模型,并与传统逆变器的 γ 进行比较分析:

a. γ_{app} 在定义上与 γ 等价,但不能反映逆变器的换相失败特性;

b. γ_{real} 与实际换相电压有关,能够真正反映换相失败的特性,在功能上与 γ 等价。

推导 γ_{real} 的数学模型,并分析影响换相失败的主要因素和影响规律:

a. 保持 β 不变时, I_{dc} 下降或者 U_1 升高, γ_{real} 随之减小,可能导致换相失败;

b. 换相电容设计值过大,由于 I_{dc} 下降或者 U_1 上升而引起换相失败的几率将增大,由于 CC 的存在, X_c 对 γ_{real} 的影响被相对削弱;

c. 交流系统不对称时,随着电压跌落的加剧,换

相性能恶化,易导致换相失败;

d. 较小的 β 整定值,不仅保证运行经济性,而且有利于避免换相失败。

CCI 虽能有效地减少换相失败的发生几率,但无法避免故障发生。因此,所得的结论对于减少和避免换相失败故障的发生具有一定的实际应用价值。

随着对电容换相技术的深入研究,可控串联电容换相的换流器 CSCC (Controlled Series Capacitor Converter) 也应运而生,其与 CCC 运行特性类似,都能够减小换相失败的可能性、增加系统运行的稳定性^[12],但换相失败发生时,故障相电容会单方向持续充电,引起串联电容的过电压,因此换相电容过电压保护将成为 CCC 实用化进程的重点^[13]。

参考文献:

- [1] OTTOSSON N, KJELLIN L. Modular back-to-back HVDC with capacitor commutated converters (CCC) [EB/OL]. [2007-04-30]. <http://www.abb.se/pow/>.
- [2] JONSSON T, HOLMBERG P, TULKIEWICZ T. Evaluation of classical, CCC and TCSC converter schemes for long cable projects [EB/OL]. [2007-04-30]. <http://www.abb.se/pow/>.
- [3] MEISINGSET M, GOLÉ A M. A comparison of conventional and capacitor commutated converters based on steady-state and dynamic considerations [EB/OL]. [2007-04-30]. <http://www.abb.se/pow/>.
- [4] FUNAKI T, MATSUURA K. Predictive firing angle calculation for constant effective margin angle control of CCC-HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 1087-1093.
- [5] 赵晓君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 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 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-8.
- [7] OU Kai-jian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system. Part 1: commutation failure factors analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8.
- [8] 任震, 何畅炜, 高明振. HVDC 系统电容换相换流器特性分析(I): 机理与特性 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 54-58.
- [9] REN Zhen, HE Chang-wei, GAO Ming-zhen. Characteristic analysis of capacitor commutated converter in HVDC system (I): mechanism characteristic [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 54-58.
- [10] 任震, 高明振, 何畅炜. HVDC 系统电容换相换流器特性分析(II): 无功功率特性 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 4-8.
- [11] REN Zhen, GAO Ming-zhen, HE Chang-wei. Characteristic analysis of capacitor commutated converter in HVDC system (II): reactive power characteristic [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 4-8.
- [12] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.
- [13] YANG Fen-yan, XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 45-52.
- [14] 郭锦艳, 文俊. CCC 的补偿度对 HVDC 系统的影响分析 [J]. 现代电力, 2005, 22(5): 38-41.
- [15] GUO Jin-yan, WEN Jun. Influence analysis of series capacitors on HVDC system with CCC [J]. Modern Electric Power, 2005, 22(5): 38-41.
- [16] SOOD V K. 高压直流输电与柔性交流输电控制装置 [M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.

- [12] SADEK K, PEREIRA M, BRANDT D P, et al. Capacitor commutated converter circuit configurations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1257-1264.
- [13] 张桂斌, 徐政. 直流输电技术的新发展 [J]. 中国电力, 2000, 33(3): 32-35.
- ZHANG Gui-bin, XU Zheng. The new development of HVDC technology [J]. Electric Power, 2000, 33(3): 32-35.
- [14] 思索. Mathcad 7.0 实用教程 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998.
- (责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

项 玲(1980-), 女, 江苏南京人, 博士研究生, 研究方向为直流输电系统故障与仿真 (**E-mail**: xiangling@jspd.com.cn);

胡敏强(1961-), 男, 江苏丹阳人, 副校长, 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;

郑建勇(1966-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力电子方面的研究。

Commutation failure of capacitor commutated inverter

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

(Electric Power Department, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Commutation failure is common in HVDC system and the study of inverter extinction angle is helpful to understand the essence of commutation failure and to design the countermeasures. The extinction angle of conventional inverter and the apparent and real extinction angles of CCI (Capacitor Commutated Inverter) as well as their mathematical equations are described, analyzed and compared. The mathematical equation of real extinction angle is deduced from the mathematical equations of extinction angle, which is used to analyze the main influencing factors of CCC commutation failure and their influence laws. The decrease of DC current or the increase of AC bus voltage may reduce the real extinction angle, resulting in commutation failure. When the commutation capacitor is too big, the commutation margin becomes smaller. The asymmetry of AC system may worsen commutation performance, resulting in commutation failure.

Key words: capacitor commutated inverter; commutation failure; apparent extinction angle; real extinction angle