

DOI: 10.7667/PSPC161985

基于逆变侧定电压控制的 HVDC 系统稳态和暂态响应特性研究

刘颖¹, 戴栋¹, 汪娟娟¹, 韩永霞¹, 李立涅¹, 傅闯²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 为测试逆变侧采用定电压控制和定关断角控制对直流输电系统稳态和暂态性能的影响, 在 CIGRE 高压直流标准测试模型原有控制系统中增加了定电压控制模块, 即整流侧采用定电流控制, 逆变侧采用定电压、定电流和定关断角控制相互配合的控制方式。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中对其整流侧和逆变侧三相短路故障下的控制器特性进行了稳态及暂态仿真分析, 并与相应的 CIGRE 标准模型暂态响应特性进行了对比。结果表明逆变侧增加定电压控制方式能够提高直流输电系统在交流故障扰动下的性能, 减少换相失败的发生几率。

关键词: HVDC; CIGRE 高压直流标准测试模型; 定电压控制; 换相失败; 暂态响应

Transient and steady responses in HVDC system based on constant voltage control at inverter side

LIU Ying¹, DAI Dong¹, WANG Juanjuan¹, HAN Yongxia¹, LI Licheng¹, FU Chuang²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: To test the effects of constant voltage control and constant extinction angle control on HVDC steady and transient performance, the control system of CIGRE HVDC benchmark model is complemented by a voltage control module, i. e. a constant current control is used at rectifier side, while a coordination control method combining voltage control, constant current control and constant extinction angle control is employed at inverter side. Steady and transient characteristics of the controller under three-phase short circuit fault at both rectifier and inverter sides are analyzed by using PSCAD/EMTDC simulations. The results show that, in comparison with CIGRE HVDC benchmark model, adding constant voltage control at inverter side could enhance the performance of HVDC system under the fault of AC side and lower the risk of commutation failure.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377061).

Key words: HVDC; CIGRE HVDC benchmark model; constant voltage control; commutation failure; transient response

0 引言

随着高压直流输电(HVDC)技术的快速发展, HVDC 控制系统在维持系统的稳定运行、减少扰动或者故障方面的重要性愈发明显^[1]。目前, 大部分 HVDC 控制系统的研究工作均建立在 CIGRE HVDC 标准测试系统模型(下文中简称 CIGRE 模型)基础上, 该系统的控制器属于 HVDC 控制系统分层结构中的极控制层。具体来讲, 整流侧由定电流控制和最小触发角(α_{\min})控制两部分组成, 而逆变侧则

由定电流控制和定关断角(γ_0)控制组成^[2]。但是需要指出的是, 当受端交流电网发生扰动引起逆变侧交流母线电压下降时, 换相角(μ)也随之增大。此种情形下, 由于关断角 γ 在逆变侧定关断角控制下趋向于不变, 因而逆变器的超前触发角 $\beta(\beta=\gamma+\mu)$ 会增加, 进而导致逆变器的无功功率增加, 并进一步使得逆变侧交流母线电压下降, 这将不利于系统的稳定运行, 且存在换相失败的隐患^[3-5]。

与定关断角控制相比, 逆变侧采用定电压控制对维持交流系统的电压稳定更为有利。逆变侧采用定电压控制时, 由于需要留有一定的调节裕度以增大直流电压, 因而在正常运行时比关断角控制时的

关断角要大,从而也减小了换相失败的几率,更有利于维持系统的稳定运行^[6-7]。

目前针对高压直流输电逆变侧控制策略的研究,国内外已经取得丰硕的研究成果。文献[8-10]介绍了定电压控制的原理,并简单介绍了其相对于定关断角控制的优势,但并未在同一算例中对逆变侧定电压和定关断角控制进行对比研究。实际上,逆变侧定电压控制在直流输电工程中已有广泛的应用,但是对逆变侧定电压和定关断角控制对直流输电系统稳态和暂态性能的影响的系统性研究仍然较少。因此,本文将在 CIGRE 模型中增加定电压控制功能,形成了逆变侧定电压、定电流和定关断角相配合的控制方式,并基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台,针对性地研究逆变侧增加定电压控制的 CIGRE 系统模型(下文简称为 CIGRE+Uctrl 模型)在三相短路故障下的稳态与暂态响应特性,将暂态响应特性结果与标准 CIGRE 模型控制方式下控制效果进行了对比,并根据其稳态响应特性绘制了系统控制特性曲线。文中变量定义见表 1。

表 1 文中变量定义表

Table 1 Definition of variables used in this paper

名称	表示符号	单位
整流站和逆变站换流阀空载线电压有效值	U_1, U_2	kV
整流站和逆变站每相的换相电抗	X_{r1}, X_{r2}	Ω
直流电流平均值	I_d	kA
整流侧和逆变侧直流电压	U_{d1}, U_{d2}	kV
整流器滞后触发角	α	$^\circ$
直流回路的等值电阻	R_d	Ω
整流侧直流电流整定值	I_{d-ref}	p.u.
整流侧和逆变侧有功功率	P_r, P_i	GW
整流侧和逆变侧无功功率	Q_r, Q_i	Gvar
整流侧和逆变侧交流母线电压	U_r, U_i	p.u.
控制模式	K	/

1 HVDC 系统控制的基本原理

对换流站而言,从直流侧看, HVDC 系统的两端均可以等效为一个直流电压源,换流器和直流线路可以分别等效为换相阻抗和线路阻抗。以一个 12 脉动换流器组成单极大地回线直流输电模型为例,其电路原理如图 1 所示,由此可以推导出 12 脉动单极 HVDC 系统直流电压^[11-14]为

$$U_{d1} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_1 \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_{r1} I_d \quad (1)$$

$$U_{d2} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \beta + \frac{6}{\pi} X_{r2} I_d \quad (2)$$

$$\text{或 } U_{d2} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \gamma - \frac{6}{\pi} X_{r2} I_d \quad (3)$$

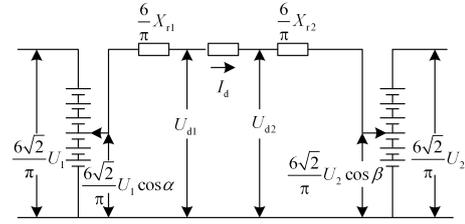


图 1 直流输电系统电路原理示意图

Fig. 1 Circuit principle of HVDC system

直流电流表示为

$$I_d = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R_d} \quad (4)$$

$$\text{或 } I_d = \frac{\frac{6\sqrt{2}}{\pi} (U_1 \cos \alpha - U_2 \cos \beta)}{R_d + \frac{6}{\pi} (X_{r1} + X_{r2})} \quad (5)$$

由式(1)一式(5)可知,直流电压和电流(或直流功率)可以通过 U_1 、 U_2 、 α 、 β 调节。调节换流变压器的分接头可以改变 U_1 、 U_2 , 但响应速度慢,在暂态过程中几乎不起作用^[15]。在交流和直流系统故障的暂态过程中,直流系统能发挥作用的控制量只有 α 、 β 。

本文在 CIGRE 模型的逆变侧增加了定电压控制,整流侧和逆变侧控制系统结构分别如图 2 和图 3 所示,定电压控制如图 3 中虚框所示。

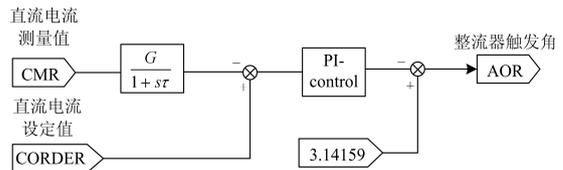


图 2 CIGRE HVDC 模型整流侧控制系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of controller at rectifier side of CIGRE HVDC benchmark model

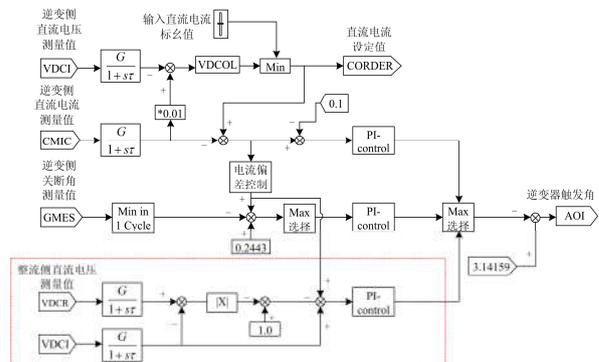


图 3 含有定电压控制的 CIGRE HVDC 模型逆变侧控制系统结构框图(虚框中为定电压控制)

Fig. 3 Block diagram of controller with constant voltage control at inverter side of CIGRE HVDC benchmark model (constant voltage control block is represented by a dotted box)

2 CIGRE+Uctrl 系统稳态特性分析

在 PSCAD 平台中对 CIGRE+Uctrl 模型在三相短路故障下的稳态响应特性进行了仿真分析, 绘制出了该模型的控制特性曲线。

2.1 整流侧故障时逆变侧控制器的稳态响应特性

当整流侧发生故障, 换流母线电压跌落不同程度时, 控制器的控制方式、系统的稳态运行点都会

发生改变^[16-18]。当整流侧换流母线电压跌落不同程度时, CIGRE+Uctrl 模型控制器的稳态响应特性如表 2 所示。

逆变侧特性曲线由定电流控制、定电压控制和定关断角控制三段构成, 通过仿真数据及式(2)可以得出其特性如图 4 中所示。可以看出, 定电压控制特性曲线为一条斜率很小的斜线。

表 2 整流侧故障时控制器稳态响应特性

Table 2 Steady-state response characteristic of controller under short circuit fault at rectifier side

整流站换流母线电压/kV	整流侧控制器控制方式	逆变侧控制器控制方式	I_d /p.u.	U_d /p.u.	α (°)	γ (°)
398.37(初始值)	定电流	定电压	1	0.988	19.45	14.31
394.3863(下降约 1%)	定电流	定电压	1	0.980	15.8914	15.3835
366.5004(下降约 8%)	定 α_{min}	电流偏差控制	0.98	0.905	5.018 69	17.5733
354.5493(下降约 11%)	定 α_{min}	电流偏差控制	0.961	0.880	5.018 69	24.3417
320.6879(下降约 19%)	定 α_{min}	电流偏差控制	0.9260	0.790	5.018 69	30.9634
286.0297(下降约 28%)	定 α_{min}	定电流(VDCOL)	0.803	0.710	5.018 69	41.4699
250.9731(下降约 37%)	定 α_{min}	定电流(VDCOL)	0.699	0.625	5.018 69	50.6531
177.2747(下降约 55%)	定 α_{min}	定电流(VDCOL)	0.500	0.45	5.018 69	63.7088
153.3725(下降约 61%)	定 α_{min}	定电流(最小电流限制)	0.45	0.400	5.018 69	68.1128
101.5844(下降约 74%)	定 α_{min}	定电流(最小电流限制)	0.45	0.25	5.018 69	75.054
31.8696(下降约 92%)	定 α_{min}	定电流(最小电流限制)	0.45	0.1	5.018 69	84.129
三相金属性接地短路故障	定 α_{min}	定电流(最小电流限制)	0.45	0	5.018 69	88.5251

2.2 逆变侧故障时整流侧控制器的稳态响应特性

逆变侧换流母线电压跌落不同程度时, CIGRE+Uctrl 模型控制器的稳态响应特性如表 3 所示。

整流侧特性曲线由定电流控制和定最小触发角两段构成, 根据 CIGRE+Uctrl 模型的系统参数、仿真数据和式(1)可以得出其特性如图 4 中所示。

综合整流侧与逆变侧特性曲线, 可以得出 CIGRE+Uctrl 模型控制系统特性曲线, 如图 4 所示。正常运行时, 整流侧处于定电流控制, 逆变侧处于定电压控制, 稳态运行的工作点为图中的两曲线的交点 M, 此时 $I_d=1.0$ p.u., $U_d=0.998$ p.u.。

表 3 逆变侧故障时控制器稳态响应特性

Table 3 Steady-state response characteristic of controller under short circuit fault at inverter side

逆变站换流母线电压/kV	整流侧控制器控制方式	逆变侧控制器控制方式	I_d /p.u.	U_d /p.u.	α (°)	γ (°)
263.1101(初始值)	定电流	定电压	1	0.998	19.5898	14.3027
252.301(下降约 4%)	定电流	定 γ_0	1	0.990	21.5923	14.35
239.022(下降约 9%)	定电流	定 γ_0	0.999	0.92	24.9191	14.3298
231.0546(下降约 12%)	定电流	定 γ_0	0.997	0.870	28.2681	14.019
207.1524(下降约 21%)	定电流(VDCOL)	定 γ_0	0.992	0.775	34.7128	14.2376
175.2828(下降约 33%)	定电流(VDCOL)	定 γ_0	0.860	0.675	47.7882	14.1553
139.4295(下降约 47%)	定电流(VDCOL)	定 γ_0	0.697	0.55	59.7903	14.081
128.4784(下降约 51%)	定电流(VDCOL)	定 γ_0	0.646	0.500	63.6428	14.0684
92.953(下降约 64%)	定电流(最小电流限制)	定 γ_0	0.55	0.385	71.345	14.02
31.8696(下降约 89%)	定电流(最小电流限制)	定 γ_0	0.55	0.13	83.7717	14.001
三相金属性接地短路故障	定电流(最小电流限制)	定 γ_0	0.55	0	86.6395	0

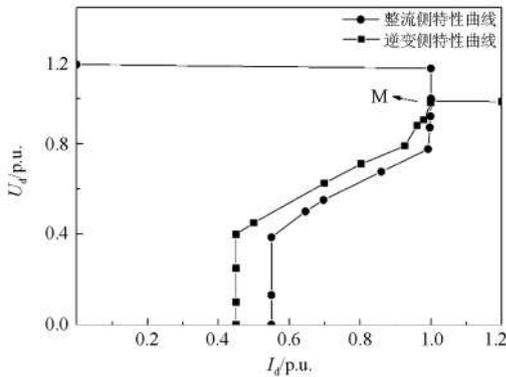


图4 CIGRE+Uctrl 模型控制系统稳态特性曲线

Fig. 4 Steady-state characteristic curves of CIGRE+Uctrl controller

3 CIGRE+Uctrl 系统三相短路故障时暂态响应特性分析

在 PSCAD 平台中对 CIGRE 模型和 CIGRE+Uctrl 模型进行了仿真,得到了 CIGRE+Uctrl 模型在整流侧和逆变侧三相短路故障下的暂态响应特性,并与对应的 CIGRE 模型仿真结果进行了对比分析。

3.1 整流侧三相短路故障时的暂态响应特性

通过改变接地电感值可以模拟交流母线电压的跌落程度^[19-20]。图 5 给出了 CIGRE 模型和 CIGRE+Uctrl 模型整流侧交流系统发生三相短路故障时的暂态响应特性,该算例中交流母线电压下降约 20%。

当 CIGRE 模型在整流侧发生三相短路故障时,首先可以看到交流母线电压、直流电压、直流电流均下降约 20%,如图 5(a)、(b)、(c)所示。尽管如此,图 5(d)则表明系统依然能够输送 70%的直流功率。需要指出的是,为了维持直流输送功率,故障期间 CIGRE 模型的整流侧控制模式发生了变化,由之前的定电流控制变为最小触发角控制,由图 5(f)可以看出,整流侧触发角被快速减小到允许的最小值 $\alpha_{\min}(5^\circ)$ 。而对于逆变侧,控制模式则依然处于定关断角控制。

故障持续 100 ms 后被切除,由图 5(g)所示的关断角大小可以看出,此时系统发生了换相失败,持续约 40 ms,并同时引起了直流电压和直流电流的大幅下降,如图 5(b)、(c)所示。在换相失败后可以观察到,逆变侧关断角首先下降至零,随后定关断角控制开始作用,快速将关断角移动到上限以提高换相裕度,同时整流侧为了控制直流电流而将控制模式转为了定电流控制。在整流侧定电流控制与逆变侧定关断角控制的配合作用下,关断角上升,系统换相成功,直流电压和直流电流也逐渐恢复,系

统最终恢复为稳定运行时的控制模式,即整流侧定电流控制、逆变侧定关断角控制。需要指出的是,定关断角控制虽然有助于系统克服换相失败的问题,但关断角增大的同时系统的无功功率损耗也随之增加,如图 5(e)所示,这将不利于交流电压的稳定。

对于 CIGRE+Uctrl 模型,在故障发生后直流电压、直流电流也下降大约 20%,如图 5(b)、(c)所示。类似地,在故障期间为了维持系统的直流输送功率,整流侧由之前的定电流控制变为最小触发角控制,如图 5(f)所示。而对于逆变侧,由图 5(h)可以看出,控制模式则依然处于稳定运行时的定电压控制。

故障持续 100 ms 后被切除,由图 5(g)可以看出此时关断角下降至 3° ,表明系统并未发生换相失败。而关断角的大幅下降引起了逆变侧控制模式的转换,由定电压控制转为定关断角控制,使得关断角逐渐上升至设定参考值。同时,整流侧为了控制直流电流而将控制模式转为了定电流控制。CIGRE+Uctrl 模型逆变侧控制模式如图 5(h)所示,从图中可以看出故障切除 100 ms 后系统逆变侧恢复为定电压控制。

CIGRE 测试系统短路比较小,约为 2.5,与 CIGRE 模型对比, CIGRE+Uctrl 模型在故障切除时未发生换相失败,其原因主要在于系统稳定运行时逆变侧处于定电压控制,而定电压控制时需要留有一定的关断角调节裕度以增大直流电压,因而在正常运行时能获得比定关断角控制下更大的关断角。如图 5(g)所示, CIGRE 模型的关断角维持在 14.12° ,而 CIGRE+Uctrl 模型的关断角则维持在 14.31° 。因而,在整流侧故障的扰动下定电压控制降低了 CIGRE+Uctrl 系统换相失败的几率,使得系统能够保持相对稳定。

3.2 逆变侧三相短路故障时的暂态响应特性

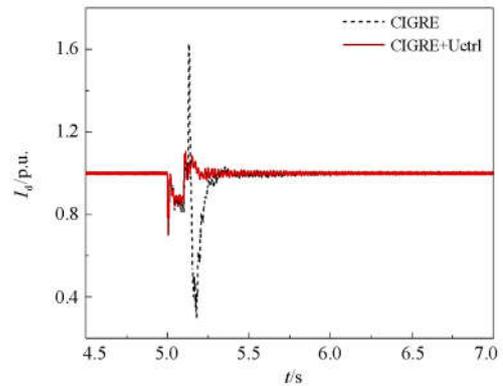
图 6 分别给出了 CIGRE 模型和 CIGRE+Uctrl 模型逆变侧三相短路故障时的暂态响应特性,该算例中交流母线电压下降约 25%。

逆变侧发生三相短路故障时, CIGRE 模型的暂态响应特性与 CIGRE+Uctrl 模型基本相似。如图 6(b)、(c)所示,故障发生时两个模型的直流电压、直流电流迅速下降,由图 6(g)中的关断角下降至零可以看出两个系统均发生了换相失败,中断了直流功率的传输。其中 CIGRE 模型换相失败持续 37 ms,而 CIGRE+Uctrl 模型则持续了 31 ms。

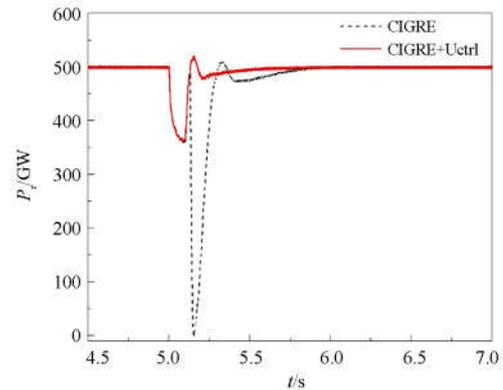
在换相失败期间,由于关断角下降到零,两个模型逆变侧均转为定关断角控制,以此来控制直流电压,而此时整流侧则通过定电流控制来维持直流

电流。在整流侧定电流控制与逆变侧定关断角控制的配合作用下, 直流电压和直流电流逐渐上升, 两个模型中的关断角也迅速上升, 系统结束换相失败。在换相失败结束的同时, 逆变侧直流电压的大幅上升使逆变侧控制模式由定关断角控制转为定电流控制。随后, 直流电压和直流电流持续上升至稳定值后, 两个模型的整流侧均恢复为定电流控制, CIGRE 模型的逆变侧转为定关断角控制, 而 CIGRE+Uctrl 模型的逆变侧则转为定电压控制。CIGRE+Uctrl 模型逆变侧控制模式的转换如图 6(h)所示。

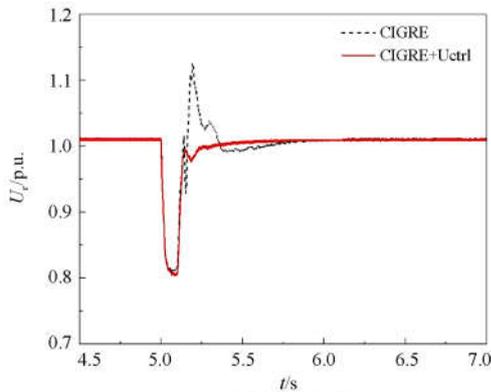
两个模型的控制效果虽然相似, 但是从图 6(g) 中可以看出, 对比 CIGRE 模型, CIGRE+Uctrl 模型在故障暂态过程中能获得更大的关断角, 从而在减少换相失败发生的几率、维持系统稳定运行方面更有利。其原因主要在于定电压控制通过调节逆变侧 β 角来维持直流电压的稳定, 当直流电压降低时, 电压调节器将减小逆变器 β 角, 使得逆变器的无功需求减小, 从而有利于换流母线电压的恢复。此外, 由于定电压控制需要留有一定的调节裕度以增大直流电压, 因而能获得比定关断角控制更大的关断角, 从而也就减小了换相失败的几率。



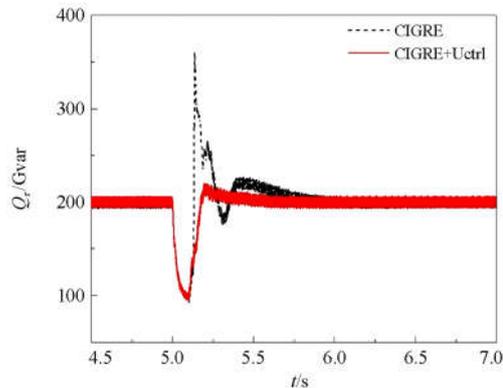
(c) 直流电流



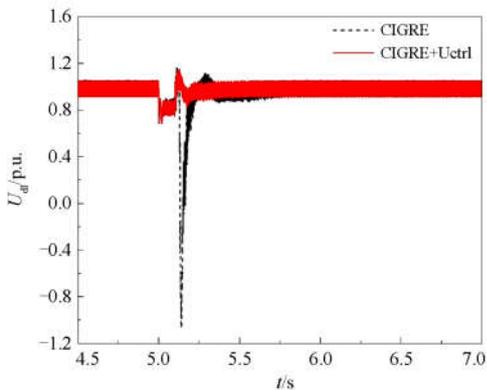
(d) 整流侧有功功率



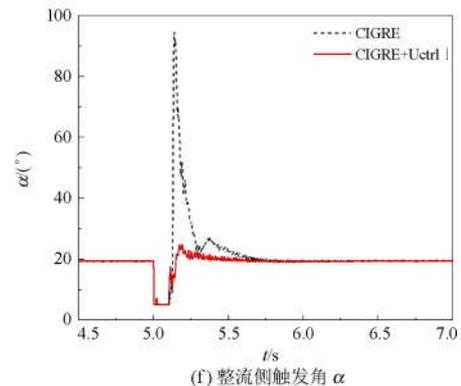
(a) 整流侧母线电压



(e) 整流侧无功功率



(b) 整流侧直流电压

(f) 整流侧触发角 α

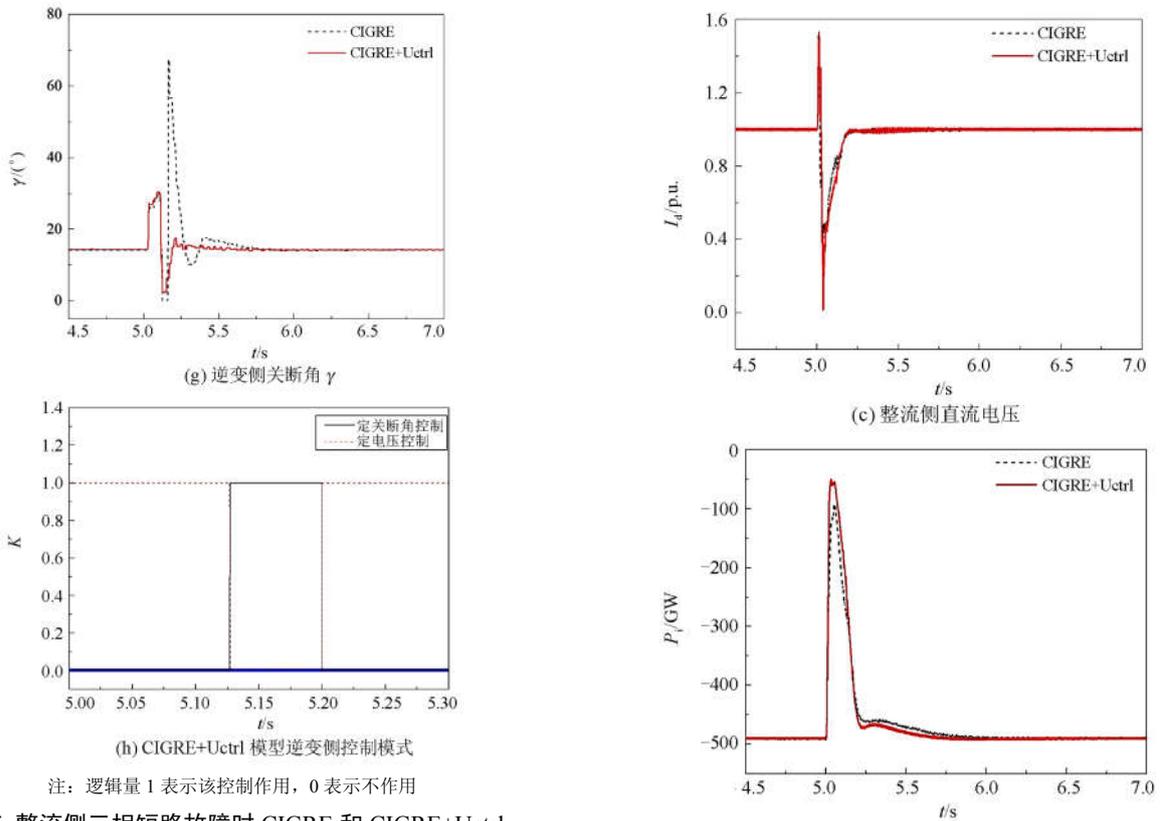
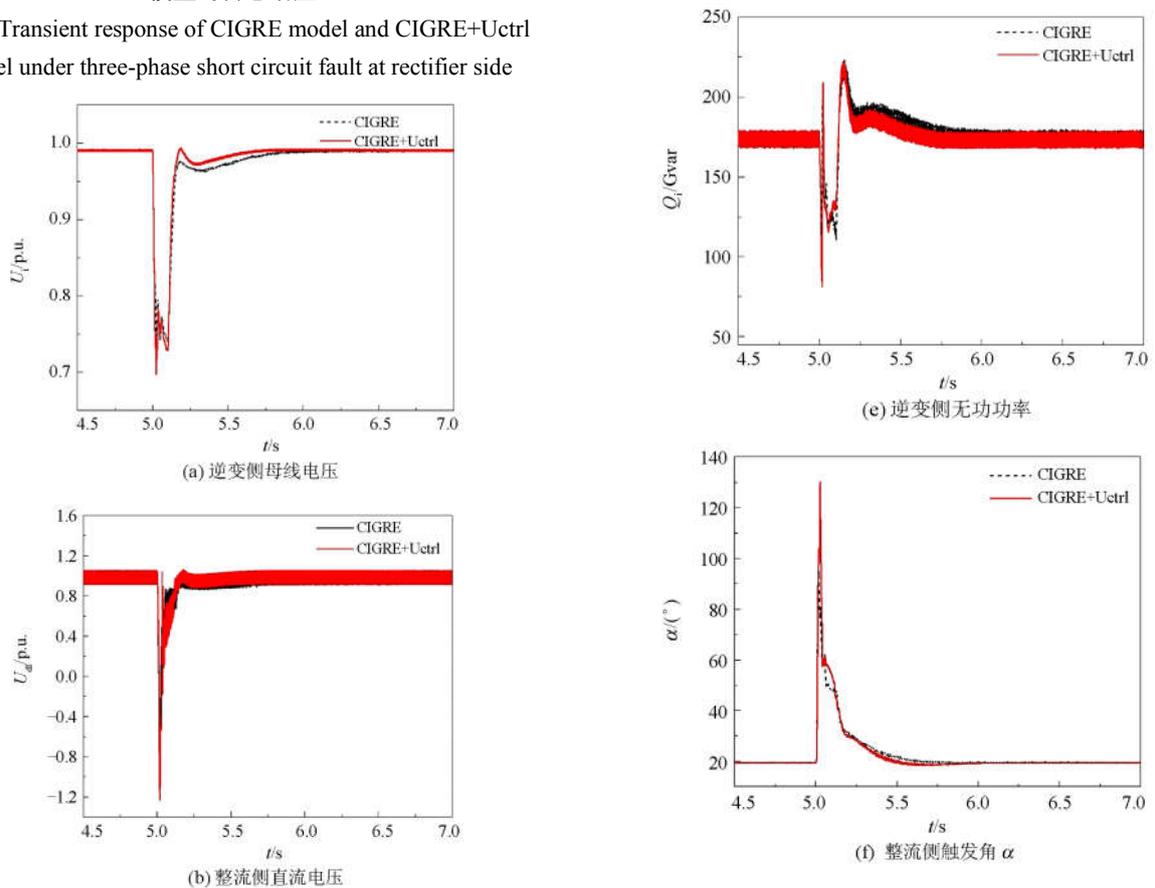


图 5 整流侧三相短路故障时 CIGRE 和 CIGRE+Uctrl 模型的暂态响应

Fig. 5 Transient response of CIGRE model and CIGRE+Uctrl model under three-phase short circuit fault at rectifier side



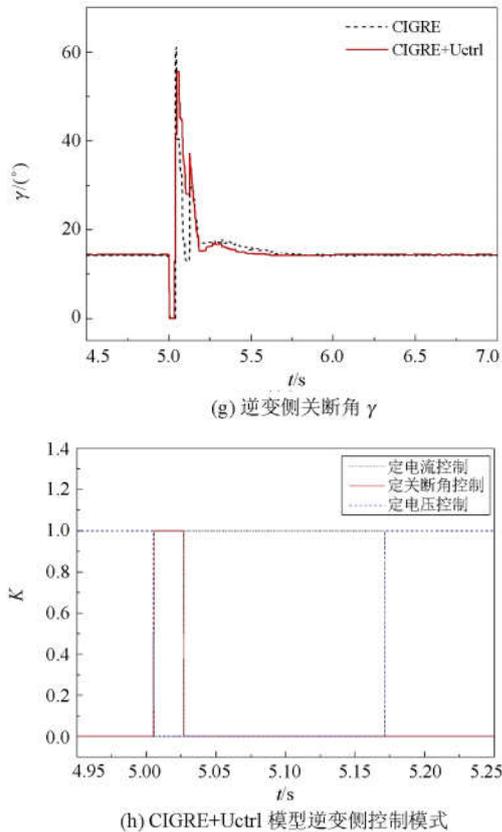


图 6 逆变侧三相短路故障时 CIGRE 和 CIGRE+Uctrl 模型的暂态响应

Fig. 6 Transient response of CIGRE model and CIGRE+Uctrl model under three-phase short circuit fault at inverter side

4 结论

1) 在 CIGRE 高压直流输电标准测试系统中增加了定电压控制功能, 可用于测试逆变侧采用定电压控制和定关断角控制对直流输电系统稳态和暂态性能的影响。

2) 增加定电压控制功能后, 系统的稳定运行点为整流器控制特性与逆变器控制特性曲线的交点, 此时整流侧运行于定电流控制, 逆变侧运行于定电压控制。在暂态过程中, 为维持逆变侧的关断角, CIGRE+Uctrl 模型的控制模式发生了迅速切换, 由定电压控制切换为定关断角控制, 响应速度快。

3) 直流输电控制系统采用整流侧定电流控制, 逆变侧定电压、定电流、定关断角相互配合的控制方式能减小整流侧三相短路故障时引起换相失败的几率, 减小逆变侧三相短路故障时发生续发性换相失败的几率, 在故障期间维持直流输电功率的输送, 减少扰动或故障对系统的危害, 提高直流输电系统

运行的安全性。高压直流输电系统逆变站应该配置定电压控制功能。

参考文献

- [1] 陶瑜, 龙英, 韩伟. 高压直流输电控制保护技术的发展与现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 8-10.
TAO Yu, LONG Ying, HAN Wei. Status and development of HVDC control and protection[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 8-10.
- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] 王镭. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-58.
WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 53-58.
- [4] 罗隆福, 付颖, 李勇, 等. 直流输电控制器原理及稳态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 65-69.
LUO Longfu, FU Ying, LI Yong, et al. Controller of HVDC transmission system and its steady-state performance analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 65-69.
- [5] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0
- [6] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 57-121.
- [7] 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, 2004: 36-50.
- [8] 陶瑜, 马为民, 马玉龙, 等. 特高压直流输电系统的控制特性[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 1-4.
TAO Yu, MA Weimin, MA Yulong, et al. Control characteristics of UHVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 1-4.
- [9] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统的基本控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 22-26.
ZHU Taoxi, WANG Chao. Basic control strategy for HVDC transmission system from Tianshengqiao to Guangzhou[J].

- Power System Technology, 2007, 31(21): 22-26.
- [10] 陈仕龙, 束洪春, 甄颖. 云广特高压直流输电负极运行换相失败及控制研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 128-133.
CHEN Shilong, SHU Hongchun, ZHEN Ying. Commutation failure of Yun-Guang UHVDC transmission system running in negative pole state and its control measures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 128-133.
- [11] 杨健, 康鹏, 林成, 等. 基于柔性直流的电磁环网建模与解环方案研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 51-56.
YANG Jian, KANG Peng, LIN Cheng, et al. Research on electromagnetic loop modeling and loop untying scheme based on VSC-HVDC[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 51-56.
- [12] 王萌, 祁明艳, 沈明辉, 等. 静止坐标系下 PWM 整流器的控制及谐波补偿策略[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 49-53.
WANG Meng, QI Mingyan, SHEN Minghui, et al. Control and harmonic compensation strategy for PWM rectifier in static coordinate system[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 49-53.
- [13] 代高富, 赵丹, 林鹏峰, 等. 基于 MMC 拓扑的有源滤波器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 74-80.
DAI Gaofu, ZHAO Dan, LIN Pengfeng, et al. Study of control strategy for active power filter based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 74-80.
- [14] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [15] 秦红霞, 孙刚, 时伯年, 等. 柔性直流配网极间故障控制保护策略与主设备参数配合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 150-156.
QIN Hongxia, SUN Gang, SHI Bonian, et al. Research on control and protection strategy of MMC based DC distribution grid with interpoles fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 150-156.
- [16] 许烽, 徐政, 傅闯. 多端直流输电系统直流侧故障的控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 74-78.
XU Feng, XU Zheng, FU Chuang. A control and protection scheme of multi-terminal DC power system for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 74-78.
- [17] 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.
YANG Fenyan, XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 45-52.
- [18] 王凯, 胡晓波. 直流电网发展历程、典型拓扑及潮流控制策略综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 39-45.
WANG Kai, HU Xiaobo. A review of development, typical topologies and power flow control strategies of DC grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 39-45.
- [19] 陈程, 汪炜将, 王佳, 等. 多馈入交直流系统有效短路比的影响因素分析[J]. 陕西电力, 2017, 45(6): 36-40.
CHEN Cheng, WANG Weijiang, WANG Jia, et al. Influencing factors analysis upon effective short-circuit ratio of multi-infeed AC/DC system[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(6): 36-40.
- [20] 赵国生, 束娜, 周志勇, 等. 新型变电站电压无功综合控制算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 37-42.
ZHAO Guosheng, SHU Na, ZHOU Zhiyong, et al. New substation voltage and reactive power control algorithm[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43(3): 37-42.

收稿日期: 2016-11-29; 修回日期: 2017-01-03

作者简介:

刘颖(1990—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电控制; E-mail: 2545113965@qq.com

戴栋(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备在线检测、气体放电、电力设备多物理场耦合计算方法及其应用、直流微网建模与能量流控。E-mail: ddai@scut.edu.cn

(编辑 魏小丽)