DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.03.009

# 抑制换相失败期间送端电网过电压的控制策略研究

刘琳[1]，雷霄[1]，孔祥平[2]，林少伯[1]，孙栩[1]，谢国平[1]
（1. 中国电力科学研究院，北京 100192；
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，江苏 南京 211103）

**摘 要**：在受端交流系统发生故障时，基于电网换相换流器的直流输电系统存在换相失败的问题，这会导致直流输送功率中断，送端无功功率过剩将造成送端交流电网过电压，可能会造成风机等新能源设备脱网。因此，提出了一种抑制换相失败期间送端过电压的控制策略，在发生换相失败时快速投入逆变侧旁通对，并根据交流滤波器总输出无功功率计算出故障期间低压限流控制特性（VDCOL）的直流电流指令值。该策略可使直流系统在有功功率中断的运行模式下，保证送端换流阀能够正常换相并维持一定的直流电流，从而避免发生送端交流电网过电压的问题。仿真结果验证了该控制策略的有效性，在不同短路比的强、弱交流系统中均可适用。

**关键词**：换相失败；无功损耗；短路比；VDCOL；控制策略
**中图分类号**：TM743 **文献标志码**：A **文章编号**：2096-3203（2019）03-0060-07

## 0 引言

我国能源中心和负荷中心分别位于西部和中东部地区，能源负荷分布极不均衡。随着我国电力需求的不断增长，能源与需求分布的矛盾日益突出，因此，直流输电技术在大容量远距离输电方面逐渐发挥出越来越大的优势[1]。然而，随着直流容量越来越大，一旦发生电网故障，容易引发单条乃至多条直流线路同时连续发生换相失败，导致短时间内输送功率中断以及潮流大范围转移[2—3]。我国西部电网较为薄弱，新能源设备数量众多，潮流中断会使送端电网短时间内发生过电压，极易达到风机等高电压穿越的限值，导致风机等新能源设备脱网[4]。

目前，已经有一些文献就换相失败期间降低对交流电网的影响展开了相关的研究工作。文献[5]通过研究直流在稳态工况和暂态过程中的送受端无功方程，优化直流低压限流环节、换相失败预测、电流控制器等参数，从而减少在换相失败期间直流与送受端电网交换的无功功率。文献[6—7]分别研究了在整流侧和逆变侧采取不同控制方式下对换相失败的影响。文献[8]总结了换相失败的抑制措施以及换相失败后的系统恢复策略。文献[9]结合实际直流输电工程，在机电暂态计算程序中搭建了直流输电系统的仿真模型，并分析了直流发生换相失败以及功率恢复过程中的仿真波形。根据对以上文献进行分析，大部分论文所研究的是直流系统在稳态运行下的有功以及无功功率控制策略，缺少在暂态过程中对送端电网特性的分析。目前，尚无文献针对如何降低送端电网母线电压波动进行定量分析及策略优化，文中将针对这一问题展开深入研究，从而避免换相失败期间风机等设备脱网的发生。

首先针对直流输电工程发生换相失败后可能引发送端交流系统过电压的问题，对换相失败后的交直流电压、直流电流、直流功率以及触发角等进行了详细的分析。然后，基于换相失败前后直流与交流系统交换无功功率平衡的原则，提出了一种新的换相失败恢复特性控制策略，以抑制送端交流过电压的问题。最后，利用与实际直流输电工程一致的仿真模型，验证了该控制策略的有效性。

## 1 换相失败期间直流系统特性分析

当受端交流系统故障导致直流发生换相失败后，直流输电系统的电压、电流均发生一定程度的跌落，直流功率传输中断[10]。整个换相失败可以大致分为 2 个阶段：第一阶段为换相失败刚发生时，逆变侧同一桥臂两个阀同时导通形成短路，直流电压降低，直流电流升高，整流侧控制系统会增大触发角以降低直流电流，直流系统消耗的无功功率增大，送端交流电压降低；第二阶段故障清除后，直流功率在触发角的调节下将逐渐恢复正常。但是，直流功率在恢复初期降至较低甚至到零，而送端换流站内交流滤波器仍发出大量无功功率，使送端交流系统出现一定的过电压[11]。对于强交流系统，由于

收稿日期：2019-01-21；修回日期：2019-02-18
基金项目：国家电网有限公司总部科技项目“特高压直流控制保护系统现场测试及运维优化关键技术研究与应用”

系统短路容量较大,过剩的无功功率对送端电压的影响较小;对于弱交流系统而言,由于短路容量较小,直流发生换相失败后送端电压会发生较大的波动。如果系统中存在风机、光伏等新能源设备,交流过电压将导致部分不具备高电压穿越或者高电压穿越能力不足的风电机组脱网,对电网安全构成威胁[12—17]。由以上分析可知,在整个换相失败过程中整流侧交流电压经历了一个先下降后上升的过程,在上升过程就可能对网内风电机组的正常运行造成影响[18]。

以目前实际直流极控系统的逻辑为基础,考虑改变换相失败及恢复过程中直流的响应特性,能在换相失败期间维持合理的电流值以保证整流侧换流阀正常换相,保证在逆变侧换相失败期间整流站换流器仍有一定的无功需求,以抵消整流站交流滤波器发出的无功功率,解决交流电压过高的问题。

## 2 抑制换相失败送端过电压控制策略

### 2.1 公式推导

故障前直流系统消耗的无功功率包括交流滤波器发出的无功功率以及与交流系统交换(交流系统流入直流系统为正)的无功功率,即:

$$Q_{dc} = Q_{ex} + Q_F \tag{1}$$

式中:$Q_F$ 为交流滤波器提供的无功功率;$Q_{ex}$ 为交流与直流系统交换的无功功率;$Q_{dc}$ 为直流系统消耗的无功功率。直流系统无功功率控制功能基本处于无功控制模式,能将 $Q_{ex}$ 控制在一个较小的死区范围以内[19—23],因此交流滤波器提供的无功功率近似等于直流系统消耗的无功功率。根据文献[24]可知,直流系统消耗的无功功率与有功功率之间的关系为:

$$Q_{dc} = P\tan\varphi \tag{2}$$

$$\tan\varphi = \frac{(\pi/180)\mu - \sin\mu\cos(2\alpha+\mu)}{\sin\mu\sin(2\alpha+\mu)} \tag{3}$$

$$U_d = 1/2\, U_{dio}[\cos\alpha + \cos(\alpha+\mu)] \tag{4}$$

$$P = U_d I_d \tag{5}$$

式中:$U_{dio}$ 为换流器理想空载直流电压;$\varphi$ 为换流器的功率因数角;$P$ 为直流功率;$I_d$ 为直流运行电流;$\alpha$ 为整流侧触发角;$\mu$ 为换相角;$U_d$ 为整流侧直流电压。

将式(3)—式(5)代入式(2),经过和差化积等计算,可以推导出直流输电系统消耗无功与直流电流之间的关系,从而得到换相失败期间电流指令值的大小,如下:

$$I_d = \frac{4\,Q_{dc}[\cos\alpha - \cos(\alpha+\mu)]}{U_{dio}[2(\pi/180)\mu + \sin2\alpha - \sin2(\alpha+\mu)]} \tag{6}$$

式(6)能够根据交流滤波器产生的无功功率以及采集到的其他相关变量实时计算直流输电系统的电流指令值,这样能够最大程度地减少换相失败前后直流系统消耗无功功率的变化,抑制换相失败引起的送端交流电压波动。

### 2.2 控制策略及流程

为了解决特高压直流输电发生换相失败导致送端交流过电压的问题,提出了一种抑制换相失败期间送端过电压的控制策略,流程如图 1 所示,具体如下:

(1) 检测到系统发生换相失败时,在逆变侧快速投入旁通对,并根据式(6),即在保证故障前后直流与交流系统交换无功功率基本平衡的原则下,确定电流指令值的大小,调整逆变侧低压限流控制特性(voltage dependent current order limitation, VDCOL)的参数。

(2) 整流侧收到对站发出的换相失败信号后,降低触发角限值至 95°,并按照(1)的原则调整整流侧 VDCOL 参数。

(3) 当检测到逆变侧交流电压恢复正常后,撤销逆变侧旁通对,取消整流侧触发角限值,恢复 VDCOL 原有参数设置。

每次旁通对投入时间要大于 60 ms,且不得高于换相失败加速段的限值,从而保证既能发挥控制策略的作用,又不会与换相失败加速段发生冲突。

该控制策略的优势是能够在稳态运行工况下不改变直流系统的响应特性,仅在暂态过程中改变控制策略从而达到改善送端电网特性的目的。

## 3 仿真验证

### 3.1 模型搭建

基于上述换相失败恢复特性控制策略,采用 PSCAD/EMTDC 软件搭建了与实际工程控制保护系统完全一致的某西北送出特高压直流仿真模型,交流电网采用电压源等效,且送端电网短路比根据实际电网进行设置,仿真步长 50 μs。直流输送功率为 8 000 MW,直流电压 800 kV,模型中换流变压器、交流滤波器、直流滤波器等参数与现场一致。模拟逆变站近区发生单相交流故障(故障时长 80 ms)导致直流发生单次换相失败,并采取文中提出的抑制送端过电压控制策略来验证策略的有效性及正确性。通过 PSCAD/EMTDC 搭建的电磁暂态仿真模

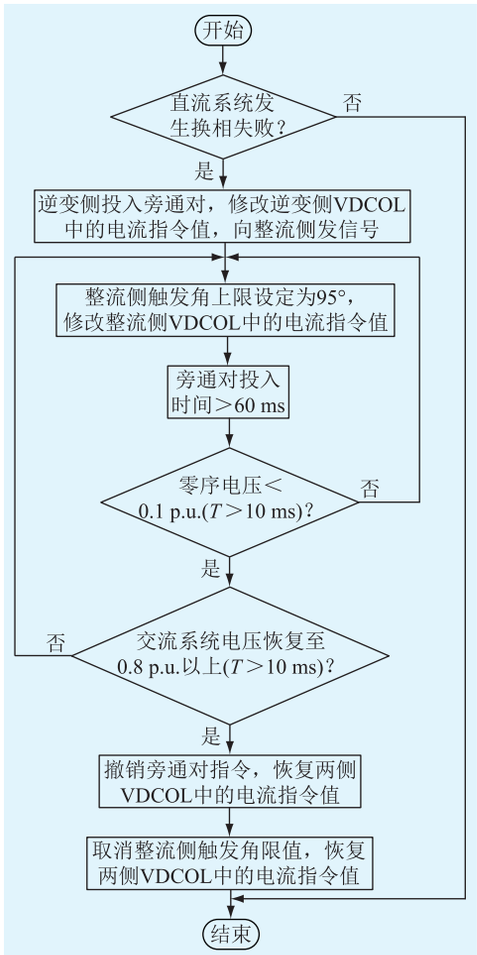



图 1　抑制送端过电压的控制策略流程

Fig.1　Flow chart of the control strategy for suppressing over-voltage at the transmitting end

型的运行计算数据可知，仿真结果与实际工程中实测的数据基本一致，从而验证了仿真模型的正确性，如表 1 所示。

表 1　极 1 低端换流器稳态运行工况

Table 1　Steady-state operating conditions of low-end converter of pole 1

| 参数 | 整流侧 | | 逆变侧 | |
|---|---|---|---|---|
| | 实测 | 仿真 | 实测 | 仿真 |
| 直流电压/kV | 362.2 | 367.8 | 330.4 | 335.9 |
| 线路压降/kV | 31.8 | 31.9 | | |
| 直流电流/A | 5 064.8 | 4 991.3 | 5 053.4 | 4 971.7 |
| 直流功率/MW | 2 000 | 2 014 | 1 670 | 1 659 |
| α 角/(°) | 15.7 | 15.4 | | |
| γ 角/(°) | | | 18 | 16.9 |
| 分接头档位 | 23 | 25 | 12 | 10 |
| 滤波器组数 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| 交流电压/kV | 778.6 | 777.2 | 510.1 | 509.0 |

## 3.2　波形分析

为了更好地分析该控制策略的作用，根据短路容量的大小分别仿真在两种不同强弱程度的交流电网下发生换相失败后，直流系统以及交流电网的响应情况。在描述直流输电换流母线电压强度时，通常采用如下的短路比(short circit ratio，SCR)来进行定量分析[25]。

$$K_{SCR}=\frac{S_{SC}}{P_{dcN}}=\frac{U_N^2}{P_{dcN}}\times\frac{1}{|Z_S|} \tag{7}$$

式中：$P_{dcN}$ 为直流功率额定值，MW；$S_{SC}$ 为交流电网短路容量，MW；$U_N$ 为送端交流电压额定值，kV；$Z_S$ 为戴维南等效阻抗。

$K_{SCR}>3$，对应的交流系统称为强系统；$K_{SCR}\in[2,3]$，对应的交流系统为弱系统；$K_{SCR}<2$，对应的交流系统为极弱系统，在实际情况中极弱系统几乎不存在。因此，分别在短路比为 2.5 以及 4.6 两种情况下，采取该换相失败恢复特性控制策略进行了仿真研究，并与未采取措施时的仿真结果进行了对比。

(1) $K_{SCR}=2.5$。直流输送功率为额定值 8 000 MW，在送端电网为弱交流系统时($K_{SCR}=2.5$)，受端交流电网 2 s 发生单相短路接地故障，且未采取该控制策略时，直流系统发生单次换相失败的情况，仿真波形如图 2 所示。

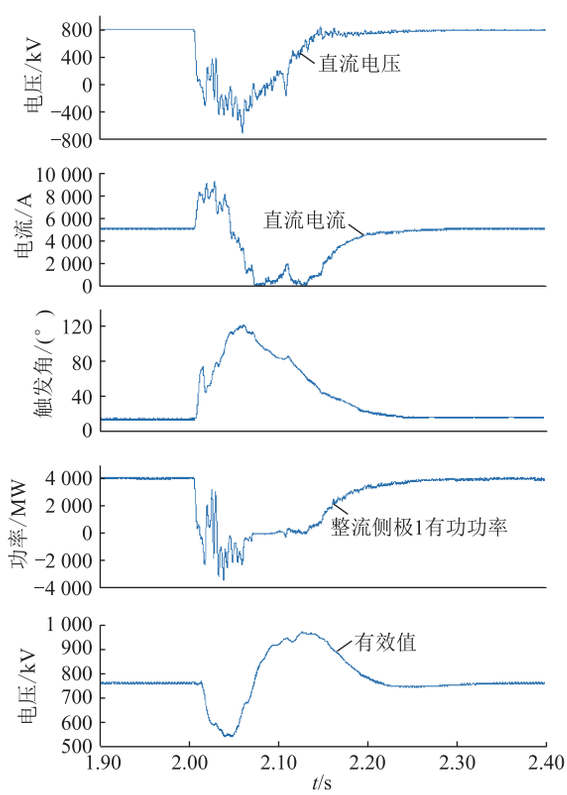



图 2　采取该控制策略前的换相失败期间波形($K_{SCR}=2.5$)

Fig.2　Waveforms during commutation failure without the control strategy($K_{SCR}=2.5$)

由图 2 可以看出，在未采取文中提出的控制策

略时,直流系统发生换相失败后,直流电压在换相失败期间跌至 0 kV 以下,直流电流在故障期间快速上升,控制系统会增大触发角指令值以降低直流电流,因此直流电流在故障恢复期间会较低甚至到零,直流输送功率发生较大幅度跌落。交流电压经历先下降后上升的过程,最低点达到 544 kV(0.725 p.u.)最高点能够达到 964 kV(1.285 p.u.)。根据对目前国内风机厂家的调研,部分厂家的风机不具备此过电压下的高电压穿越能力,存在风机由于超过其高电压穿越能力而脱网的可能性[26]。

在仿真模型中模拟文中提出的换相失败恢复特性控制策略,在逆变侧换流阀投入旁通对,并调整控制系统电流指令值以保证发生换相失败前后直流系统无功功率平衡,从而平抑送端交流电压的波动,如图 3 所示。

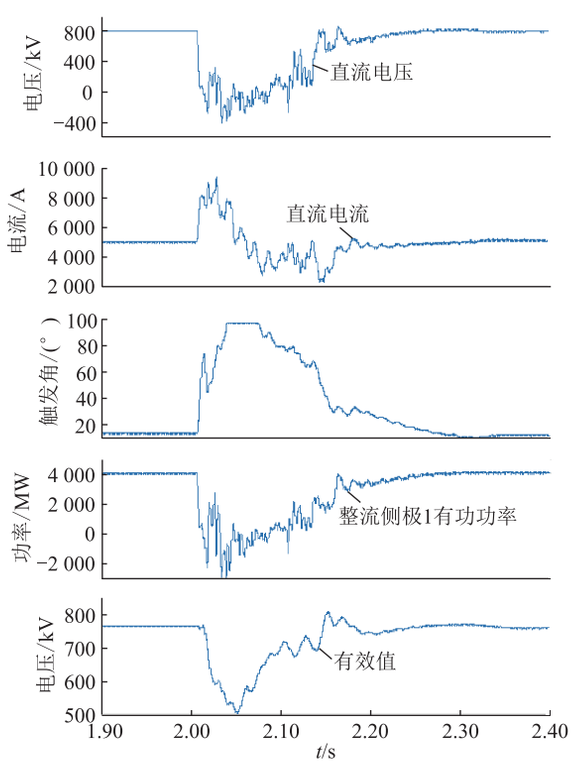



**图 3 采取该控制策略后的换相失败期间波形($K_{SCR}$=2.5)**

Fig.3 Waveforms during commutation failure using the control strategy ($K_{SCR}$=2.5)

由图 3 可以看出,采用该控制策略后,与不采取控制策略相比,直流电流在故障期间同样快速增大,但由于整流侧触发角限值设定为 95°,在电流恢复阶段不会短时间内发生较大幅度的跌落。根据交流滤波器输出无功功率实时计算得到的电流指令,能够使整流侧的直流电流保持在整定值附近,在换相失败前后有功功率中断的情况下仍然保证换流器的无功功率消耗,从而抑制送端电网电压升高的问题,电压最低值不低于 510 kV(0.680 p.u.),电压最高值不超过 805 kV(1.073 p.u.),低于相关风机厂家关于高电压穿越的限值。

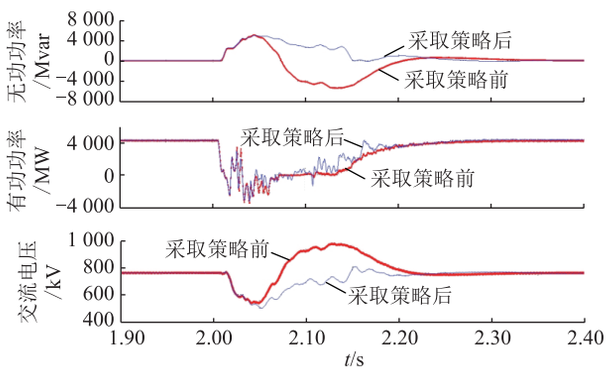



**图 4 采取控制策略前后的对比图($K_{SCR}$=2.5)**

Fig.4 Waveform with and without the control strategy ($K_{SCR}$=2.5)

图 4 为采取控制策略前后电网与直流系统交换的无功功率、直流输送有功功率以及交流母线电压对比图。从图 4 中可以看出故障发生前交流滤波器产生的无功功率与直流系统消耗的无功功率接近,与交流系统交换功率控制在死区范围内。未采取该控制策略时,发生故障后直流系统先从交流电网中吸收了大量的无功,随后又向电网发出大量的无功功率,导致交流电网送端电压升高,而采取控制策略后则能够控制在故障期间直流系统产生与交流滤波器平衡的无功功率消耗,从而避免向交流电网注入无功。但由于故障恢复阶段直流电流实际值接近指令值,导致触发角调节速度较慢,且该时间段内触发角较大,因此 2.05~2.15 s 之间直流系统消耗无功仍大于交流滤波器产生的无功功率,需要从系统中吸收一定的无功功率。从图中还可以看出在故障期间有功功率曲线在采取该控制策略前后差别不大,这说明该控制策略未对换相失败期间直流恢复特性造成显著影响。交流母线电压有效值的对比可以看出该控制策略能够很好的抑制电压波动,防止交流母线过电压的发生。

(2) $K_{SCR}$=4.6。为了对比不同强弱程度交流系统在发生换相失败时的响应情况,仿真计算在送端电网为强交流系统下($K_{SCR}$=4.6),受端交流电网 2 s 发生单相短路接地故障,且未采取该控制策略时,直流系统发生单次换相失败的情况,仿真波形从上到下分别是发生换相失败时的直流电压、直流电流、触发角指令值、极 1 功率以及送端母线交流侧电压有效值的变化情况,如图 5 所示。

图 2 与图 5 对比后可以看出,在未采取该控制

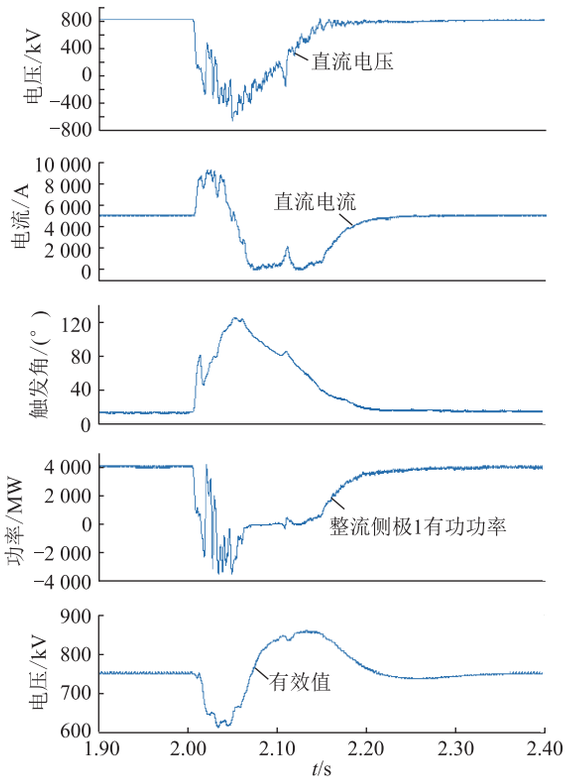



图 5　采取该控制策略前的换相失败期间波形($K_{SCR}$=4.6)

Fig.5　Waveforms during commutation failure without the control strategy($K_{SCR}$=4.6)

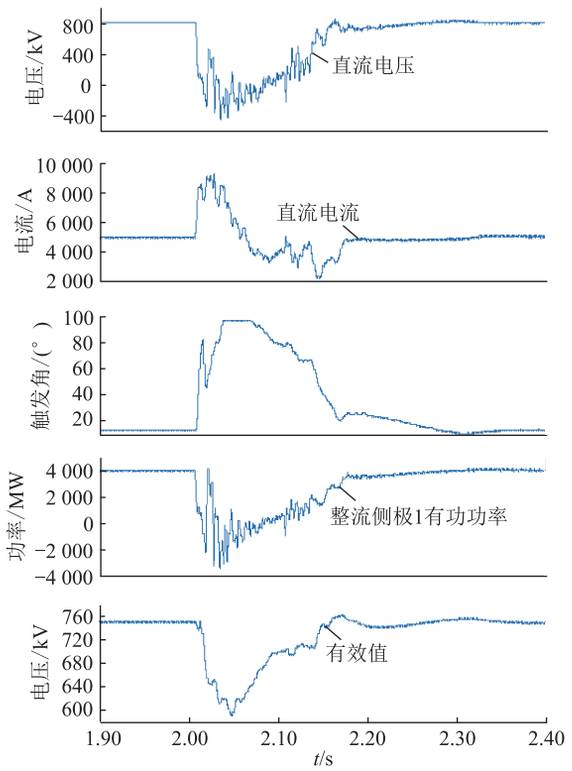



图 6　采取该控制策略前的换相失败期间波形($K_{SCR}$=4.6)

Fig.6　Waveforms during commutation failure using the control strategy($K_{SCR}$=4.6)

策略时,直流系统发生换相失败后,直流电压、直流电流、触发角指令值以及直流功率的波形差别不大,直流电压和极 1 直流输送功率均发生较大幅度跌落,直流电流经历先下降后上升的过程。但与弱交流系统相比,图 5 中电压波动明显降低,最低点为 616 kV(0.821 p.u.),最高点为 855 kV(1.140 p.u.)。由此可知,交流系统短路容量越大,送端电网电压波动越小。

在送端电网为强交流系统的仿真模型中模拟该换相失败恢复特性控制策略,如图 6 所示。

图 3 与图 6 对比后可以看出,不同系统强度下采取该控制策略后,直流电压、直流电流、触发角指令值以及直流功率的波形差别不大,直流电压和直流输送功率均发生较大幅度跌落。但是与弱交流系统相比,图 6 中送端交流电压在故障期间电压波动幅度明显变小,最低点为 594 kV(0.792 p.u.),最高点不超过 760 kV(1.013 p.u.)。由图 6 可见,与弱交流系统相比,在强交流系统中采用该控制策略,能够保证送端电网交流电压波动值更小。

根据图 7 可以得出与图 4 类似的结论,且短路比越大,无功功率的变化对系统电压的影响越小,交流电压波动越小。综上,采取文中提出的控制策略后,直流系统在换相失败期间的有功功率恢复特性未受到影响,且直流系统消耗的无功功率能够抵消故障过程中交流滤波器输出的过剩无功,从而抑制了送端电网的过电压。

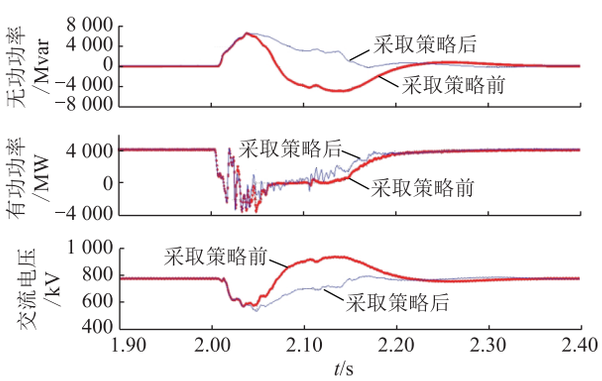



图 7　采取控制策略前后的波形对比图($K_{SCR}$=4.6)

Fig.7　Waveforms with and without the control strategy($K_{SCR}$=4.6)

## 4　结语

为了降低特高压直流输电工程换相失败过程中送端交流电压过高导致风电机组脱网的风险,基于目前实际特高压直流工程相关控制逻辑,提出了

一种换相失败恢复特性控制策略,以暂态过程中无功平衡作为控制条件,通过实时计算整流站电流指令值实现换相失败过程中无功功率平衡控制,以降低换相失败过程中的送端系统交流电压波动,且该策略能够适应直流接入不同强度交流系统的需求。通过仿真验证了控制策略的有效性,仿真结果表明该策略能够很好地抑制直流换相失败期间送端交流电网的过电压问题。

**参考文献:**


[1] 李新年,易俊,李柏青,等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术,2012,36(6):266-271.
LI Xinnian, YI Jun, LI Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure of HVDC transmission system[J]. Power Grid Technology, 2012, 36(6): 266-271.

[2] 俞翔, 陈乐, 邹强, 等. 特高压直流单换流器退出引起过压问题的分析及优化[J]. 电力工程技术, 2018,37(6):145-150,155.
YU Xiang, CHEN Le, ZOU Qiang, et al. Analysis and optimization of overvoltages in UHVDC project caused by exiting of converter [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 145-150,155.

[3] 史秋娟. 特高压直流输电无功补偿及其控制策略的研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
SHI Qiujuan. Research on reactive power compensation and control strategy of UHV DC transmission [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.

[4] 傅伯雄. 风力发电并网低/高电压穿越技术的研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2015.
FU Boxiong. Research on low/high voltage ride-through technology for wind power grid-connected [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.

[5] 屠竞哲,张健,曾兵,等. 直流换相失败及恢复过程暂态无功特性及控制参数影响 [J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2131-2138.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, ZENG Bing ,et al. Transient reactive power characteristics and control parameters of DC commutation failure and recovery process [J]. High Voltage Technology, 2017, 43(7): 2131-2138.

[6] 陈仕龙,荣俊香,毕贵红,等. 整流侧控制方式对特高压直流输电系统换相失败影响研究[J]. 中国电力,2015, 48(7) : 1-7.
CHEN Shilong, RONG Junxiang, BI Guihong, et al. Study on the influence of rectifier side control mode on commutation failure of UHV DC transmission system [J]. China Electric Power, 2015, 48(7) :1-7.

[7] 李亚男,卢亚军,刘心旸,等. 逆变侧控制策略对换相失败的影响及恢复特性优化研究[J]. 电力建设, 2015, 36(9): 112-116.
LI Yanan, LU Yajun, LIU Xinxi ,et al. Study on the influence of inverter control strategy on commutation failure and optimization of recovery characteristics[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(9): 112-116.

[8] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):140-147.
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Wei, et al. Review of research on commutation failure of HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.

[9] 洪潮. 直流输电系统换相失败和功率恢复特性的工程实例仿真分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 1-7.
HONG Chao. Engineering example simulation analysis of commutation failure and power recovery characteristics of HVDC transmission system[J]. China Southern Power Grid Technology, 2011, 5(1): 1-7.

[10] 李新年,陈树勇,庞广恒,等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6):134-140.
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery capability of east China multi-DC feeding system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(6):134-140.

[11] 李峰, 李兴源. 特高压直流输电相关问题的综述[J]. 四川电力技术, 2006, 29(6): 13-19.
LI Feng, LI Xingyuan. A summary of issues related to UHVDC transmission [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2006, 29(6): 13-19.

[12] 徐鹏, 赵成勇, 曹雅榕. 一种典型混联直流输电系统的运行特性分析[J]. 电力工程技术, 2018,37(5):148-154.
XU Peng, ZHAO Chengyong, CAO Yarong. Analysis on operating characteristic for a typical hybrid HVDC transmission system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):148-154.

[13] 惠慧. 高压直流输电系统的仿真建模[D]. 北京:华北电力大学,2009:6-7.
HUI Hui. Simulation modeling of HVDC transmission system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009: 6-7.

[14] 赵琳,叶丽雅,杨勇,等. 550 kV GIS 隔离开关操作引起特快速瞬态过电压仿真研究[J]. 浙江电力,2018,37(12): 86-92.
ZHAO Lin,YE Liya,YANG Yong,et al. Simulation study on very fast transient overvoltage during operation of 550 kV GIS disconnector[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(12): 86-92.

[15] 童凯,宣佳卓,许烽,等. 浙江电网特高压直流输电工程保护闭锁策略[J]. 浙江电力,2018,37(2):31-35.
TONG Kai,XUAN Jiazhuo,XU Feng,et al. Protection locking strategy of Zhejiang UHVDC transmission project[J]. Zhejiang Electric Power,2018,37(2):31-35.

[16] 汪剑峰,康龙. 特高压直流故障下的负荷控制精准度研究[J]. 浙江电力,2018,37(3):22-25.
WANG Jianfeng,KANG Long. Research on load control precision under UHVDC faults [J]. Zhejiang Electric Power,2018, 37(3):22-25.

[17] 蒋道宇. 高压直流输电系统部分直流控制保护策略分析与优化[D]. 广州:华南理工大学,2011:13-18.
JIANG Daoyu. Analysis and optimization of partial DC control protection strategy for HVDC transmission system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 13-18.

[18] 黄梦华, 汪娟娟. 低压限流环节优化控制策略综述[J]. 广东电力技术, 2018, 31(10): 10-19.
HUANG Menghua, WANG Juanjuan. Overview of optimal control strategy for low-voltage current limiting[J]. Guangdong Electric Power Technology, 2018, 31(10): 10-19.

[19] 王晶. 高压直流输电典型故障控制保护策略的研究[J]. 北京:华北电力大学, 2018: 9-14.
WANG Jing. Research on typical fault control and protection strategy of HVDC transmission[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 9-14.

[20] 谢华,姜崇学,赵青春,等 . 含柔性直流输电系统的交流线路保护适应性分析 [J]. 供用电,2017,34(8):17-22.
XIE Hua,JIANG ChongXue,ZHAO Qingchun,et al. Adaptability analysis of AC line protection with flexible HVDC transmission system [J]. Distribution & Utilization,2017,34(8): 17-22.

[21] 陈大鹏,于海,于锋,等. 特高压直流工程控制与保护系统内嵌式暂态数据录波方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(17):125-130.
CHEN Dapeng, YU Hai, YU Feng, et al. Embedded transient data recording scheme for UHVDC project control and protection system [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (17): 125-130.

[22] 陈文滨. 特高压直流输电系统故障恢复特性的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010:9-21.
CHEN Wenbin. Research on fault recovery characteristics of UHV DC transmission system [J]. Guangzhou:South China University of Technology, 2010: 9-21.

[23] 王少辉,唐飞,刘涤尘,等. 应对多直流同时换相失败的直流功率能量补偿调制方法[J]. 电网技术,2018,42(9): 2876-2884.
WANG Shaohui, TANG Fei, LIU Dichen, et al. A DC power energy compensation modulation method for multi-DC simultaneous commutation failure [J]. Power Grid Technology,2018, 42(9):2876-2884.

[24] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
ZHAO Wanjun. HVDC power transmission engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

[25] 洪潮. 馈入弱交流系统的直流输电换相失败恢复特性对输电能力的影响分析[J]. 南方电网技术,2017,11(3):6-13.
HONG Chao. Analysis of the influence of recovery characteristics of HVDC commutation failure on feeding capacity of weak AC system[J]. South China Power Grid Technology,2017,11(3):6-13.

[26] 艾飞. HVDC 换相失败判据及恢复策略的研究[J]. 四川电力技术,2008, 31(4): 10-13.
AI Fei. Research on HVDC commutation failure criterion and recovery strategy [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2008, 31(4): 10-13.

作者简介:


刘琳

刘琳(1988),女,硕士,工程师,从事特高压直流控制保护系统分析与仿真相关工作(E-mail:liulin@epri.sgcc.com.cn);

雷霄(1985),男,硕士,高级工程师,从事特高压直流输电技术与大电网仿真分析相关工作(E-mail:leixiao@epri.sgcc.com.cn);

孔祥平(1988),男,博士,高级工程师,从事分布式电源接入的电力系统保护、直流控制保护系统等相关工作。

## The control strategy for suppressing overvoltage of sending grid during commutation failure

LIU Lin[1], LEI Xiao[1], KONG Xiangping[2], LIN Shaobo[1], SUN Xu[1], XIE Guoping[1], ZHOU Yifu[1]

(1. China Electrical Power Research Institute,Beijing 100192,China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute,Nanjing 211103,China)

**Abstract**:When the AC system of the receiving end fails, the DC transmission system based on the grid commutator has a problem of commutation failure, which will cause the DC transmission power to be interrupted. The excess reactive power at the sending end will cause the AC system to overvoltage. In turn, it is possible to cause new energy equipment such as wind turbines to be disconnected from the network. Therefore, a control strategy is proposed to suppress over-voltage at the transmitting end during commutation failure. The specific strategy is to quickly input bypass switch of the inverter side when the commutation failure occurs and calculate the DC current command value during the fault according to the reactive power consumption before the fault. The strategy can maintain a certain DC current in the mode of the active power interruption, thereby ensuring the converter valve can normally commutate and have a certain reactive power consumption to avoid the overvoltage problem of AC grid. The simulation results verify the effectiveness of the control strategy which can be applied to both strong and weak AC systems with different short-circuit ratios.

**Keywords**:commutation failure;reactive power loss;short circuit ratio;VDCOL;control strategy

(编辑　钱悦)