

直流控制方式对受端电网电压稳定性影响

刘晓明, 慈文斌, 刘玉田

(山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 系统分析了直流系统的基本输电控制方式和极控制方式、低电压下的模式转换控制以及依赖于电压的电流指令限制单元(VDCOL)控制对受端系统电压稳定性的影响。考虑到固定参数的 VDCOL 难以适应受端系统运行方式的多变性和故障的复杂性, 提出了一种基于逆变电站交流母线电压水平的动态自适应 VDCOL 控制策略。该控制策略中, VDCOL 的高电压门槛值随逆变电站交流母线电压变化而动态变化, 能够在不同情况下合理控制直流电流。仿真表明, 新型 VDCOL 有助于提高受端交流系统电压稳定性。

关键词: 交直流混合系统; 电压稳定; 直流控制方式; VDCOL

中图分类号: TM 712; TM 732

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)04-0069-05

0 引言

高压直流输电(HVDC)以其输送容量大、损耗小、有效限制短路电流、功率可控等特点在电力系统中得到了广泛应用。HVDC 在为交流系统提供电力的同时, 也给其电压支撑能力带来了压力。换流设备在换流过程中要消耗大量的无功功率。世界范围内已发生过多起交直流混合系统的电压失稳事故^[1], 如何提高其电压稳定性受到普遍关注^[2-4]。受端交流系统的电压稳定性与直流系统控制方式紧密相关, 直流系统的基本输电控制方式和极控制方式以及低电压下的控制方式对其有重要影响。

直流系统的基本输电控制方式和极控制方式为正常情况下直流系统的控制方式。文献[5-6]分析了不同直流控制方式对电压稳定因子(VSF)的影响。文献[7]将特征值分析法应用于不同直流控制方式下多机交直流并联电力系统动态电压稳定性分析。文献[8]分析了直流系统的不同控制方式对鞍结分叉点和霍普夫分叉点的影响。文献[9]根据负荷导纳模型算法, 求取不同直流控制方式对换流母线节点功率裕度、临界电压和交流系统注入换流站无功功率的影响。

低电压下的控制方式主要有模式转换控制和依赖于电压的电流指令限制单元 VDCOL(Voltage Dependent Current Order Limiter)控制。文献[10]分析了 VDCOL 某个参数变化可能对系统稳定性产生的影响。文献[11]在太平洋联络线上设计了交流低压限流紧急控制器, 在整流侧严重故障导致交流电压明显下降时启用。文献[12]提出了依赖于交流换相电压的具有切换功能的 VDCOL 控制。该文还改进了

VDCOL 曲线, 在系统恢复过程中使直流电流的恢复滞后于直流电压的恢复。文献[13]在多馈入直流系统各逆变电站 VDCOL 后增加延时环节和最小选择单元, 并对各回直流子系统逆变侧的 VDCOL 延时环节时间常数进行协调优化。

本文基于换流器准稳态模型, 推导了直流系统基本输电控制方式和极控制方式与受端交流系统电压稳定性的关系。分析了模式转换控制和 VDCOL 控制在受端系统电压降低时的作用。考虑到固定参数 VDCOL 很难适应交流系统运行方式的多变性及故障的复杂性, 针对山东电网, 提出了一种基于逆变电站交流母线电压水平的动态自适应 VDCOL 控制策略。

1 基本输电控制方式和极控制方式

直流系统的基本输电控制方式为定功率模式和定电流模式。极控制通常以整流侧控制直流电流, 逆变侧控制熄弧角或直流电压^[14]。在直流系统正常运行情况下, 基本输电控制方式和极控制方式共同作用影响着交流系统的电压稳定性。下面将分析其对受端交流电网电压稳定性的影响。

设 P_d 为直流功率, I_d 为直流电流, U_d 为逆变侧直流电压, E 为逆变电站交流母线电压, U_v 为逆变侧换流变压器交流侧电压直接折算到阀侧的电压, T 为逆变侧换流变压器变比, X_c 为逆变侧换相电抗, β 为触发超前角, γ 为关断角, φ 为逆变侧功率因数角。因为无功和电压强相关, 下面主要分析不同直流基本输电控制方式和极控制方式对逆变器消耗无功功率的影响。换流器各方程式如下:

$$Q = P_d \tan \varphi \quad (1)$$

$$P_d = U_d I_d \quad (2)$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}E}{\pi T} \cos \beta + \frac{3X_c}{\pi} I_d \quad (3)$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}E}{\pi T} \cos \gamma - \frac{3X_c}{\pi} I_d \quad (4)$$

$$\cos \varphi \approx \frac{\cos \gamma + \cos \beta}{2} \quad (5)$$

$$\cos \beta = \cos \gamma - \frac{\sqrt{2} I_d X_c}{U_V} \quad (6)$$

为使推导简单清晰,忽略直流线路的容性效应和阻抗。

a. 定功率模式, 逆变侧定电压控制(CV/P)。在该控制方式下, 正常运行时直流传输功率不变。当逆变侧交流电网受到扰动使 E 下降时, 由式(3)~(5)可得, $\cos \beta$ 、 $\cos \gamma$ 和 $\cos \varphi$ 均增大, 逆变器功率因数提高。由式(1)得, 逆变器消耗的无功功率减小, 有利于防止交流电压的进一步下降。但是 γ 的减小可能导致逆变侧发生换相失败, 这成为逆变侧定电压控制的劣势。

b. 定电流模式, 逆变侧定熄弧角控制(CEA/I)。由式(4)得, 当逆变侧交流电网受到扰动使 E 下降时, U_d 下降, 故直流传输功率减小。由式(5)(6)得, $\cos \beta$ 和 $\cos \varphi$ 减小, 逆变器功率因数降低。综合所传输有功功率和功率因数变化, 逆变器消耗的无功功率变化情况要视系统实际运行状态而定。

c. 定电流模式, 逆变侧定电压控制(CV/I)。在逆变侧定电压控制条件下, 定电流模式和定功率模式的稳态效果是一样的。当逆变侧交流电网受到扰动使 E 下降时, 逆变器消耗的无功功率减小, 有利于防止电压的进一步下降和可能发生的电压崩溃现象。

d. 定功率模式, 逆变侧定熄弧角控制(CEA/P)。当逆变侧交流电网受到扰动使 E 下降时, U_V 下降。由式(2)(4)可得, U_d 下降, I_d 上升。由式(5)(6)可推出, $\cos \beta$ 和 $\cos \varphi$ 减小, 逆变站的功率因数降低。综合传输功率和功率因数, 逆变器消耗的无功功率增多, 可导致交流电压的进一步下降。如果逆变侧交流电网较弱, 如此恶性循环可能导致受端交流电网电压崩溃。

综上所述, 直流系统基本输电控制方式和极控制方式的不同对逆变器消耗无功功率的影响很大。逆变侧的定电压控制在受端交流电压较低时通过减小触发超前角和关断角来维持直流电压恒定, 从而减小了对交流系统无功功率的吸收, 有利于受端交流系统的电压稳定, 但将增大逆变侧发生换相失败的概率。故在定电压控制中常将熄弧角控制作为限制器使用。逆变侧的定熄弧角控制在故障发生或恢复期间能够保持熄弧角不变而不易发生换相失败, 但是受端交流系统的低电压会引起触发超前角增大进而引起换流站功率因数降低, 不利于受端交流系统的电压稳定。

2 低电压下直流系统控制方式

当因逆变侧交流系统故障导致受端交流电压和直流电压降低明显时, 低电压下的直流系统控制方式能够有效抑制直流电流增加或减小直流电流, 进

而限制逆变器消耗的无功功率, 有利于受端交流系统故障后的电压稳定和快速恢复。低电压下的直流系统控制方式主要分为 2 类: 一类为功率控制向电流控制的模式转换, 另一类为 VDCOL 控制。

2.1 功率控制向电流控制的模式转换

通常情况下需要直流系统在交流电网间输送一定的功率。当逆变侧交流电网受到大扰动使直流电压降低明显时, 若直流系统仍要传输额定功率, 逆变器消耗的无功功率可能要比正常情况下多。如果逆变侧无功补偿采用并联电容器组, 其能提供的无功功率则随其母线电压降低而平方减小。这样就需受端交流系统提供大量无功功率, 可能导致其电压崩溃。一般情况下, 当逆变侧直流电压低于某一设定值时, 设置直流控制由定功率模式转化为定电流模式。相对于定功率控制模式而言, 在低电压情况下, 定电流控制模式时直流系统输送功率减小, 逆变器消耗的无功功率也相应减小, 有利于故障后交直流系统的快速恢复。

2.2 VDCOL 控制

当受端交流电压或直流电压降低非常严重时, 如果仍要维持直流系统的定功率或定电流模式, 将从交流系统吸收相当多的无功功率, 不利于受端交流系统的电压稳定。VDCOL 的作用是在交流电压或直流电压降低到某个指定值的时候对直流电流进行限制, 在系统故障或恢复过程中减小对交流系统的无功需求, 有助于维持交流电压和减小发生换相失败的可能性^[15]。

3 动态自适应 VDCOL

常规的固定参数 VDCOL 典型特性如图 1 所示。图中, I_{des} 为直流电流给定值, I_{ord} 为直流电流指令值, U_{DC} 为直流电压, U_{AC} 为交流换相电压, I_{MAX} 为经低压限流后最大允许电流值, I_H 为最大直流电流, I_L 为最小直流电流, U_L 为低电压门槛值, U_H 为高电压门槛值。

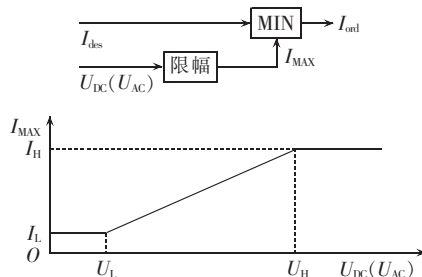


图 1 典型 VDCOL 特性

Fig.1 Typical VDCOL characteristics

固定参数 VDCOL 特性主要受 4 个参数 (I_H 、 I_L 、 U_H 和 U_L) 的影响, 其整定值应根据系统在一系列扰动和低电压下的运行特性确定。在极端情况下, VDCOL 的参数整定值对电压稳定非常关键。文献[10]仿真了参数 U_H 的不同取值对南方电网故障后功率和电压恢复的影响。如 U_H 整定值过低, 在低电

压时限流效果不明显,不利于受端交流系统的电压稳定;如 U_H 整定值过高,则在电压较高时就限制直流电流,不利于直流系统的功率恢复,甚至反过来影响电压恢复速度。交流系统运行方式复杂多变,故障多样,固定参数的 VDCOL 很难适应其变化。

在受端交流系统受到大扰动导致逆变站附近电压下降严重时,逆变站交流母线电压能较好反映受端系统的电压水平。因此可以根据逆变站交流母线电压的变化,通过自动调整 U_H 的整定值来实现自适应。

检测交流电压启动的 VDCOL 在交流电压跌落时可以限制无功的消耗,但在直流故障时效果可能不明显;检测直流电压启动的 VDCOL 在直流故障和交流电压跌落时都可以有较好的效果。故在长距离直流输电工程中大多采用检测直流电压启动^[15]。

本文提出的动态自适应 VDCOL 控制特性如图 2 所示。自适应 VDCOL 通过检测直流电压 U_{DC} 启动,即依据直流电压并结合其动态特性曲线来确定 I_{MAX} 。 U_H 随逆变站交流母线电压的变化而改变:

$$U_H = C - U_{ac} \quad (7)$$

其中, C 为常数, U_{ac} 为逆变站交流母线电压。其中折线 $FABE$ 对应于常规的固定参数 VDCOL 特性。当逆变站交流母线电压降低非常严重时,动态 VDCOL 如折线 $FADE$ 所示,相比固定参数 VDCOL,其限流效果更明显,在交流系统严重故障时能更好地减小换流器消耗的无功功率;当逆变站交流母线电压恢复至一定程度时,动态 VDCOL 可与折线 $FABE$ 重合或变为折线 $FACE$,放宽了对直流电流的限制,有助于直流系统的功率恢复。

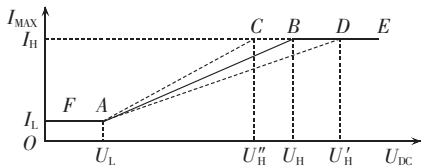


图2 动态自适应 VDCOL 特性

Fig.2 Characteristics of dynamic adaptive VDCOL

根据工程经验,当 U_{ac} 恢复至 0.9 p.u. 以上时,认为当前电压恢复良好,应放宽对直流电流限制以使直流功率快速恢复;当 U_{ac} 低于 0.9 p.u. 时,认为当前电压情况不理想,此时应严格限制直流电流进而限制直流功率,防止因直流功率的快速恢复而可能导致系统发生电压失稳。 C 设置为当 U_{ac} 恢复至 0.9 p.u. 时,动态自适应 VDCOL 和固定参数 VDCOL 特性曲线重合。

VDCOL 作用效果与网络结构关系密切,需根据系统实际情况决定是否给 U_H 设定相应限值。若受端电网与外网联系紧密(如山东电网),当逆变站交流母线电压下降严重时,直流功率被限制,有功功率缺额可由区域间交流联络线来承担,系统不易发生功角失稳,可不给 U_H 设定限值。若受端电网与外网联系相对薄弱,限制直流功率可能导致区域间发生功角

失稳。此时需给 U_H 设定相应的限值,以使对直流功率的限制维持在一定范围内。 U_H 限值的取值根据系统在一系列扰动下的运行特性确定。

4 实例分析

宁东—青岛 ± 660 kV 直流输电工程是世界上首个 ± 660 kV 电压等级的直流输电工程^[16]。按照国家电网公司规划,宁东—青岛直流输电一期工程第一回直流于 2011 年建成双极送电 4000 MW。山东电网 2011 年青岛逆变站附近网架结构如图 3 所示。

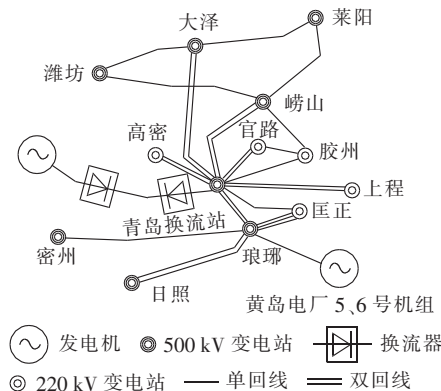


图3 2011年青岛逆变站附近网架结构

Fig.3 Power grid nearby Qingdao inverter substation

仿真中采用 PSS/E 自带的 CDC6T 模型。仿真数据取 2011 年山东电网某典型运行方式,有效短路比为 6.8。在该运行方式下,辛安—聊城双回 500 kV 联络线由华北向山东送电 1302.8 MW,黄骅—滨州双回 500 kV 联络线由华北向山东送电 1198.2 MW。

4.1 基本输电控制方式和极控制方式仿真

比较了当受端交流系统发生故障时,不同的直流系统基本输电控制方式和极控制方式对逆变器消耗无功功率和受端交流电网电压稳定性的影响。当青岛—崂山双回交流 500 kV 线路检修,1 s 时刻黄岛电厂 5、6 号机组因故障退出运行时,部分结果如图 4~7 所示(图中,曲线 1、2、3 分别对应 CV/I、CEA/I 和 CEA/P 控制, U_d 和 U_{ac} 为标么值)。

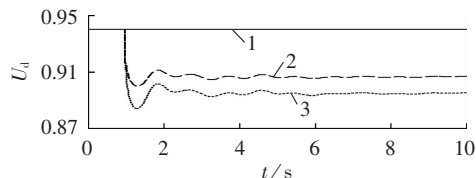


图4 逆变侧直流电压

Fig.4 DC voltage at inverter-side

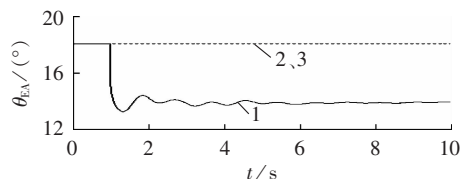


图5 逆变侧熄弧角

Fig.5 Extinction angle at inverter-side

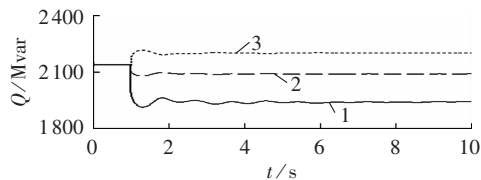


图 6 逆变器消耗无功功率

Fig.6 Reactive power consumed by inverter

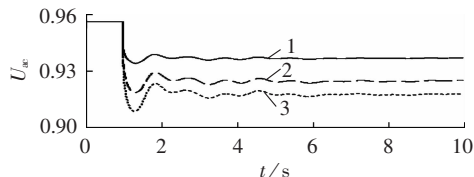


图 7 青岛换流站 500 kV 交流母线电压

Fig.7 500 kV AC bus voltage of Qingdao converter substation

如果直流系统没有发生换相失败或闭锁, CV/P 控制和 CV/I 控制效果相同。从图 4、5 中可以看出, 故障后逆变侧的定电压控制和定熄弧角控制能够分别控制相应量保持不变。定熄弧角控制下故障后直流电压降低, 这主要是因为无功电源的失去导致交流换相电压降低, 交流换相电压的降低引起了直流电压的降低。定电压控制通过减小熄弧角来维持直流电压, 熄弧角最小降低至 13.3° 。熄弧角的减小虽然可以帮助维持直流电压, 但增加了换相失败的风险。

从图 6、7 可以看出, 故障后 CV/I (CV/P) 控制为维持直流电压而减小熄弧角相应地减小了逆变站消耗的无功功率, 因而青岛换流站 500 kV 交流母线电压降低最少。CEA/P 控制在电压降低时仍要维持直流系统输送功率和熄弧角不变, 逆变站消耗的无功功率升高, 青岛换流站 500 kV 交流母线电压降低也最明显。CEA/I 控制对逆变侧电压及无功的影响在前两者之间。

综上所述, 山东电网比较强壮, 一般故障下交流系统能够给予直流系统足够的无功支持。为了在区域间传输额定功率和有效防止换相失败, 宁东—青岛直流输电工程宜采用 CEA/P 控制。

4.2 动态自适应 VDCOL 仿真

仿真中直流控制方式为 CEA/P 控制。固定参数的 VDCOL 各参数取值为 $U_L=0.2$ p.u.、 $I_L=0.3$ p.u.、 $U_H=0.8$ p.u.、 $I_H=1.1$ p.u.。设置当逆变站交流母线电压恢复至 0.9 p.u. 时, 动态自适应 VDCOL 与固定参数 VDCOL 特性曲线重合, 即 $0.8=C-0.9$, 可得 $C=1.7$ p.u.。

为验证自适应 VDCOL 在不同电压下的作用, 仿真情景设置为: 青岛—大泽双回 500 kV 交流线路检修; 1 s 时刻黄岛电厂 5 号、6 号机组因故障切除; 3 s 时刻青岛—崂山双回 500 kV 交流线路断线; 6 s 时刻在青岛换流站 500 kV 交流母线处投入 820 Mvar 备用无功补偿。部分结果如图 8~12 所示 (图中, 曲线 1、2 分别对应固定参数 VDCOL 和自适应 VDCOL)。

在 1 s 时刻失去黄岛电厂 5 号和 6 号机组后, 交

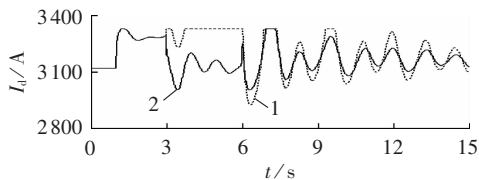


图 8 直流电流

Fig.8 DC current

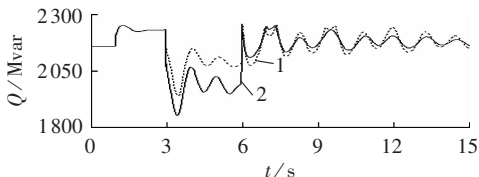


图 9 逆变器消耗无功功率

Fig.9 Reactive power consumed by inverter

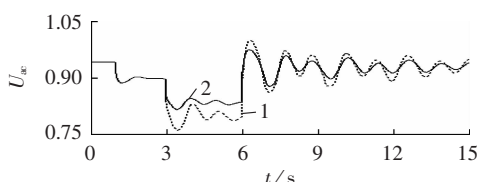


图 10 青岛换流站 500 kV 交流母线电压

Fig.10 500 kV AC bus voltage of Qingdao converter substation

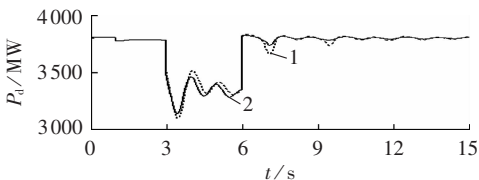


图 11 青岛换流站直流功率

Fig.11 DC power transmitted by Qingdao converter substation

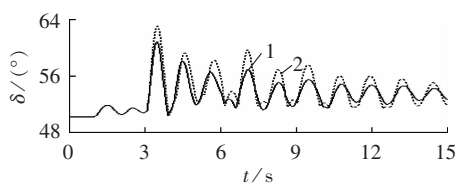


图 12 系统内发电机间的最大功角差

Fig.12 Maximum power-angle difference between generators

流电压下降, 相应直流电压也降低, 为了维持额定的直流传输功率, 直流电流升高, 如图 8 所示。逆变侧的定熄弧角控制降低了逆变器功率因数, 其消耗的无功功率增多, 如图 9 所示。青岛换流站采用并联电容器组作为无功补偿, 在其母线电压降低时并联电容器发出的无功功率平方降低, 这就需要交流系统给予直流系统大量的无功支持。无功功率主要经由 500 kV 交流线路传输至逆变站。此时固定参数 VDCOL 和自适应 VDCOL 都未限制直流电流, 故仿真曲线重合。3 s 时刻失去青岛—崂山双回 500 kV 交流线路时, 重要无功传输路径被切断, 电压下降严重, 固定参数 VDCOL 和自适应 VDCOL 都动作限制直流电流, 相应减小了逆变器的无功消耗。从图 8~

10可以看出,自适应VDCOL的限流作用要优于固定参数VDCOL,这也使得在相同故障下青岛换流站500 kV交流母线电压较高。青岛换流站直流功率和系统内发电机间的最大功角差 δ 曲线如图11、12所示。

在6 s时刻投入备用无功补偿后,逆变侧电压恢复,动态自适应VDCOL放宽了对直流电流的限制,直流功率很快恢复至额定水平。从图11、12中可以看出,相对于固定参数VDCOL,动态自适应VDCOL能够有效减小电压恢复后直流功率和系统功角的振荡。

仿真结果表明:自适应VDCOL在逆变侧交流电压下降不明显时与固定参数VDCOL一样,不对直流电流进行限制,这样可以保证直流系统传输额定功率;在严重故障导致逆变侧交流电压和直流电压下降明显时,自适应VDCOL相比于固定参数VDCOL,能够更好地限制直流电流,减小逆变器消耗的无功功率,有利于受端交流系统电压稳定;在逆变侧电压恢复时,自适应VDCOL放宽了对直流电流的限制,有利于直流功率的快速恢复。

某些特殊情况下,逆变站附近无功极度缺乏时,自适应VDCOL在电压严重下降时的强限流可对防止电压崩溃起到明显作用。

5 结论

分析了直流系统的控制方式对受端交流系统电压稳定性的影响。相比定熄弧角控制,逆变侧的定电压控制有利于受端交流系统的电压稳定,但增加了发生换相失败的风险。功率控制向电流控制的模式转换和VDCOL控制在低电压下能够有效限制直流电流,减小逆变器的无功消耗。

VDCOL作用效果与电网结构关系密切。提出了基于逆变站交流母线电压水平的动态自适应VDCOL控制策略。山东电网的仿真表明:在受端低电压情况下其能够根据交流系统的电压水平合理控制直流电流,有助于交流系统的电压稳定;在受端电压恢复时则放宽对直流电流的限制,有利于直流功率的快速恢复。

参考文献:

- [1] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1993: 187-193.
- [2] 谢惠藩,张尧,夏成军,等. SVC对特高压紧急直流功率支援的影响[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 6-10.
XIE Huifan, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Influence of SVC on UHV emergency DC power support[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 6-10.
- [3] 杨卫东,徐政,韩祯祥. 多馈入直流输电系统的协调恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(11): 63-66.
YANG Weidong, XU Zheng, HAN Zhenxiang. Coordinated recovery strategy for multi-infeed HVDC systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(11): 63-66.
- [4] 胡金磊,张尧,胡文锦,等. 多运行方式下恢复交直流系统潮流可行域的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 39-43.
- HU Jinlei, ZHANG Yao, HU Wenjin, et al. Control strategy of feasible region recovery for power flow of AC/DC system under multi-operating conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 39-43.
- [5] PILOTTO L A S, SZECHTMAN M, HAMMAD A. Transient AC voltage related phenomena for HVDC schemes connected to weak AC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1396-1404.
- [6] HAMMAD A E, KUHN W. A computation algorithm for accessing voltage stability at AC/DC interconnections[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 209-216.
- [7] 刘明波,程劲辉,程莹. 交直流并联电力系统动态电压稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(16): 27-30.
LIU Mingbo, CHENG Jinghui, CHENG Ying. Dynamic voltage stability analysis of parallel AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 27-30.
- [8] AIK D L H, ANDERSSON G. Nonlinear dynamics in HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1417-1426.
- [9] 徐梅梅,李兴源,白加林,等. 交直流并联系统的换流母线电压稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 6-10, 26.
XU Meimei, LI Xingyuan, BAI Jialin, et al. Analysis on voltage stability at commutation buses of parallel AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 6-10, 26.
- [10] 张建设,张尧,张志朝,等. 直流系统控制方式对大扰动后交直流混合系统电压和功率恢复的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 20-24.
ZHANG Jianshe, ZHANG Yao, ZHANG Zhichao, et al. Influence of DC system control modes on voltage and power recovery after large disturbance in hybrid AC/DC systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 20-24.
- [11] BUNCH R, KOSTEREV D. Design and implementation of AC voltage dependent current order limiter at Pacific HVDC intertie[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 697-703.
- [12] 王珂,杨卫东,方勇杰,等. 有利于多馈入直流输电系统协调恢复的VDCOL控制策略研究[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(1): 1-4.
WANG Ke, YANG Weidong, FANG Yongjie, et al. Study of VDCOL control strategies for coordinated recovery of multi-feed-in HVDC system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(1): 1-4.
- [13] 汪娟娟,张尧,林凌雪. 交流故障后MIDC系统的协调恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 79-82.
WANG Juanjuan, ZHANG Yao, LIN Lingxue. Coordinated recovery strategy of MIDC system after AC faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 79-82.
- [14] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 96-102.
- [15] 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: 40-42.
- [16] 赵良,郭强,覃琴,等. ± 660 kV同塔双回直流线路与其送/受端交流系统的相互影响[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 83-86.
ZHAO Liang, GUO Qiang, QIN Qin, et al. Research on interaction of ± 660 kV power transmission project adopting layout of double circuit on the same tower with AC power systems at its sending and receiving ends[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 83-86.

(实习编辑: 李 莉)

作者简介:

刘晓明(1984-),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为交直流混合电网电压稳定性(E-mail: yylxiuxiaoming@mail.sdu.edu.cn);

(下转第77页 continued on page 77)

慈文斌(1983-),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为直流输电系统安全运行与控制(**E-mail**:ciwenbin@sdu.edu.cn);

刘玉田(1964-),男,山东青州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制(**E-mail**:liuyt@sdu.edu.cn)。

Influence of DC system control mode on voltage stability of receiving-end power grid

LIU Xiaoming, CI Wenbin, LIU Yutian

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: The influences of DC system's basic transmission mode, pole control mode, mode shift control and VDCOL(Voltage Dependent Current Order Limiter) on the voltage stability of receiving-end power grid are analyzed. As the VDCOL with fixed parameters could not easily adapt to the operating mode variability and fault complexity of receiving-end power grid, a dynamic adaptive VDCOL control strategy is proposed based on the AC bus voltage level of inverter substation. The high-voltage threshold changes with the variation of AC bus voltage to well control the DC current in different conditions. Simulation shows that the proposed strategy improves the voltage stability of receiving-end power grid.

Key words: AC/DC hybrid power system; voltage stability; DC system control mode; VDCOL