

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.012

直流控制对逆变器无功调节特性影响的研究

李 妮¹, 李兴源¹, 冯 明¹, 洪 潮², 王 超¹

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心, 广州 510080)

摘要: 为了改善直流逆变站的无功功率特性, 合理利用直流系统本身的无功调节特性来提升弱受端系统的电压稳定性, 对直流控制方式与逆变器无功需求之间的关系进行了比较详细的分析。基于弱受端直流系统模型, 首先根据直流系统 U_d-I_d 特性曲线分析得到直流系统各种可能的控制模式下的无功特性, 以及各控制模式对无功功率的调节能力; 然后分析了熄弧角裕度、VDCOL 参数、控制器调节速度这 3 种因素对逆变器无功调节的影响, 并根据仿真结果总结了它们的调节规律及作用范围。对弱受端直流系统无功调节策略的确定具有一定的指导意义。

关键词: 直流控制; 无功特性; 弱受端系统; 影响因素

Research on the Influence of HVDC Control on Inverter Reactive Power Regulation

LI Ni¹, LI Xingyuan¹, FENG Ming¹, HONG Chao², WANG Chao¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: To improve the reactive power characteristics of inverter station, and voltage stability of the inverter weak AC system through utilizing the reactive power regulation characteristics of HVDC system reasonably, it is necessary to analyze the relationship between HVDC control and inverter reactive power demand in detail. Based on a certain HVDC system model connected to a weak AC system in this paper, the reactive characteristics of each operating mode of the HVDC system varying with HVDC inverter AC bus voltage is obtained according to the HVDC U_d-I_d characteristic curve, and then the regulation ability of each mode on reactive power is analyzed. Finally, the influence of extinction angle margin, VDCOL parameter, and regulation speed of status parameter on the regulating reactive power of inverter is also analyzed, and their regulation rules and scope according to the simulation results are summarized. The conclusion of the study has some significance in reactive regulation strategy for the weak-end HVDC system.

Key words: HVDC control; reactive power characteristics; weak AC system; influence factors

0 引言

随着中国大规模、远距离、密集落点的直流输电格局的形成, 受端系统日益突出的无功供需矛盾已成为交直流电网亟需解决的问题之一^[1]。由于直流系统无功与直流控制的强相关特性, 利用直流调制控制参与受端系统无功/电压的稳定控制具有重

要意义。特别是对弱受端系统而言, 不当的直流控制方式及控制参数, 引起的动态无功失衡将最终导致暂态电压失稳^[2-6]。

采用半控型晶闸管进行换相的直流逆变器, 在向受端系统传输有功功率的同时总会吸收相应量的容性无功功率^[7]。因此有关直流系统与受端电压稳定性的关系一直是研究的热点^[8-10], 但由于完善的暂态电压稳定性理论尚未建立, 故对其影响机理的研究仍然不够深入。文[11-12]从仿真角度分析了故

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-03-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51037003); 南方电网公司科技项目(K-KY2013-001)。

Prototed Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(51037003), the Science and Technology Program of China Southern Power Grid Company Limited(K-KY2013-001).

障及恢复期间,减小换流器无功需求对系统动态性能的改善作用;文[13-15]从国内外实际直流输电工程的角度,证明了无功调制对提高系统阻尼、改善电压稳定的有效性;但是,现有的直流系统无功调制大多只是关于熄弧角的调制,调节效果有限^[16];文[17]提出将逆变站作为动态无功源的新观点,给出了直流无功紧急控制策略的新思路;文[1,18]均肯定了直流参与电网稳定控制的重要性,认为直流控制的潜能有待进一步挖掘。

笔者从逆变器详细控制模型出发,首先解析逆变器无功需求特性与系统状态量的关系;然后,分析在受端交流电压变化时各直流控制模式下的逆变器无功特性,以及每种控制模式对逆变器无功功率的调节能力;最后,分析了 3 种控制因素对逆变器无功的影响及其作用范围,为直流无功控制技术的优化提供了依据。

1 直流输电系统研究模型

1.1 逆变器无功需求数学模型

逆变器无功功率需求与全系统状态呈现复杂的非线性关系,在直流系统稳态时,其数学模型可表示为^[19]:

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_b K_i U_i; \quad (1)$$

$$Q_d = P_d \tan \varphi; \quad (2)$$

$$P_d = U_{di} I_d \cos \varphi = U_{di} I_d; \quad (3)$$

$$\tan \varphi = \frac{\frac{\pi}{180} \mu - \sin \mu \cos(2\gamma + \mu)}{\sin \mu \sin(2\gamma + \mu)}. \quad (4)$$

式(1)~(4)中: Q_d 、 P_d 分别为换流器吸收的无功功率和传输的有功功率; U_i 为逆变侧换流母线的线电压有效值; N_b 、 K_i 分别为换流桥个数与换流变变比; U_d 、 I_d 分别为直流电压与直流电流。

可见,逆变器的无功需求取决于系统运行状态 P_d 与 φ , 但当任一状态量如 U_i 、 I_d 、 γ 发生变化时,传输功率及功率因素的改变,使无功需求随之变化。在上述状态量中, U_i 为交流系统运行状态,是交流系统对直流系统的唯一影响参数^[20]; I_d 、 γ 为直流系统运行状态,具有非线性控制特性。为此,研究直流控制对无功特性的影响机理,就必须考虑 U_i 对直流系统状态的影响。

1.2 直流系统仿真模型

文中以双极 12 脉动直流输电系统为仿真测试模型,见图 1。直流控制系统为 CIGRE 标准测试系统的控制结构,控制过程均采用 PI 控制器实现,忽略换流变分接头变化,系统的主要参数见表 1。其

中:下标 N 表示额定运行状态; L_d 为直流输电距离; E_s 、 Z_s 分别为交流系统等值电势及等值阻抗; U_H 、 U_L 、 I_L 为 VDCOL 控制参数。

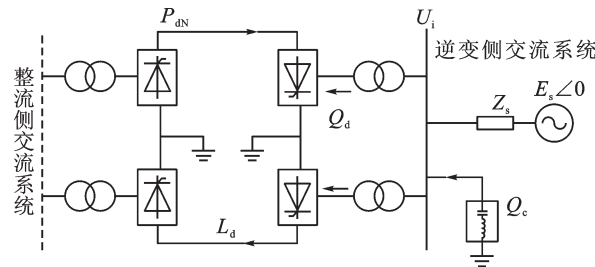


图 1 直流系统模型

Fig. 1 Network for HVDC transmission system

表 1 直流系统参数

Table 1 Operating parameters of HVDC system

参数	数值	参数	数值
P_{dN}/MW	3 000	$\gamma_{\min}/(^{\circ})$	15
I_{dN}/kA	3	L_d/km	1 210
U_{dN}/kV	500	$U_H/\text{p.u.}$	0.8
U_{iN}/kV	500	$U_L/\text{p.u.}$	0.4
N_b	2	$I_L/\text{p.u.}$	0.55
K_i	500.0/200.6	Z_s/Ω	8.60+j32.18

2 各种控制模式下的无功特性分析

直流系统运行的控制模式受到换流母线电压的影响^[21]。当受端系统扰动造成电压不同程度的跌落时,直流系统存在 4 种主要的控制模式,见图 2,其中 A、B、C、D 分别为对应控制模式的一个运行点,代表 4 种控制模式。文中以图 1 所示的弱受端直流系统为例,基于静态稳定性分析的方法,研究了各控制模式下逆变器无功需求特性。

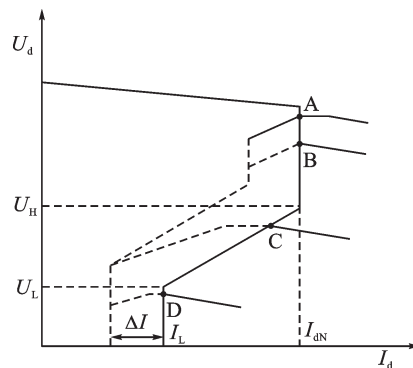


图 2 U_i 变化时直流系统的 4 种控制模式

Fig. 2 Four control mode of HVDC system with U_i changes

2.1 CC-CV 控制模式的无功特性

直流系统正常运行时,考虑整流侧为电流控制(CC),逆变侧为定直流电压控制(CV)。在 CC-CV 控制模式下,逆变侧母线电压幅值必须足够高,使得

直流电流能跟随功率调节器输出的电流整定值 I_{dN} 以及逆变器能维持直流电压在整定值附近 U_{dN} 。设该模式的稳定运行点如图 2 中点 A, 此时 $I_d = I_{dN}$, $U_d = U_{dN}$, 逆变器运行特性满足

$$\begin{cases} U_{dN} = U_{doi} \cos \gamma - d_{xi} I_{dN} \\ \cos \varphi = \frac{U_{dN}}{U_{doi}} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $d_{xi} = \frac{\pi}{3} X_c$, X_c 为换相电抗。将式(5)代入式(2), 则该控制模式下逆变器无功需求特性为

$$Q_d = f(U_i, \gamma) = U_{dN} I_{dN} \sqrt{\frac{U_{doi}^2}{U_{dN}^2} - 1} \quad (6)$$

由式(6)可知, Q_d 是关于交流电压 U_i 和熄弧角 γ 的函数。当交流电压小幅下降时, CC-CV 控制模式通过减小 γ 角, 使直流电压恢复到整定值。在它的控制范围内, U_i 越小, $\cos \varphi$ 就越高, 逆变器需求的无功功率则越小, 但有功功率随 U_d 、 I_d 的恒定而维持不变, 其特性曲线见图 3。

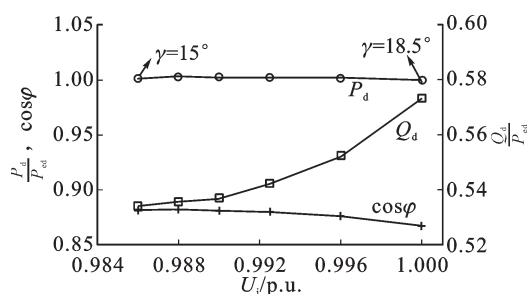


图 3 CC-CV 控制模式的无功与 U_i 的关系

Fig. 3 Reactive power characteristics of CC-CV control mode with U_i changes

2.2 CC-CEA 控制模式的无功特性

逆变侧采用定直流电压控制方式或者定熄弧角控制方式时, 均存在该种控制模式。即 U_i 降落至一定范围内, 整流侧仍能维持直流电流, 逆变侧不再具有 γ 角调节裕度, 而进入定熄弧角控制(CEA)。设该控制模式的一个运行点如图 2 中 B 所示, 此时 $I_d = I_{dN}$, $\gamma = \gamma_0$, 逆变器运行特性满足

$$\cos \varphi = \cos \gamma_0 - \frac{\sqrt{2} I_{dN} X_c}{U_{doi}} \quad (7)$$

将其代入式(2)中, 可得逆变器的无功特性

$$Q_d = f(U_i) =$$

$$I_{dN} \sqrt{U_{doi}^2 (1 - \cos^2 \gamma_0) + 2 U_{doi} \cos \gamma_0 d_{xi} I_{dN} - d_{xi}^2 I_{dN}^2} \quad (8)$$

式(8)中, 当正常运行采用定直流电压控制策略时, $\gamma_0 = \gamma_{min}$ 。可见在 CC-CEA 控制模式下, 直流运行状态量可视为常数, Q_d 只是关于交流电压 U_i 变化的函数。令式(8)右端式 = S, 则 $\frac{dQ_d}{dU_i} = \frac{2 I_{dN} [(1 - \cos^2 \gamma_0) U_{doi}^2 + 2 \cos \gamma_0 d_{xi} I_{dN}]}{S}$, 可知 $\frac{dQ_d}{dU_i} > 0$, 即该控制

模式下 Q_d 将随 U_i 的下降而减少, 功率特性见图 4。随着 U_i 下降, 逆变器功率因素减小, 会加剧直流功率的下降, 逆变器无功功率需求变化则介于直流功率与功率因素变化之间。

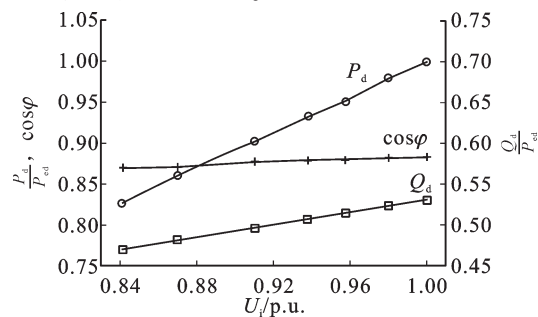


图 4 CC-CEA 控制模式功率与 U_i 的关系

Fig. 4 Reactive power characteristics of CC-CEA control mode with U_i changes

2.3 VDCOL-CEA 控制模式的无功特性

逆变侧换流母线电压降落使直流电压低于 U_H 时, 如图 2 中运行点 C, 整流侧转入 VDCOL 段控制, 逆变侧仍处于定熄弧角控制模式。此时电流指令将随直流电压的降落而减小, 设 $I_d = I_{dord}$ 能立即满足, 逆变器运行特性为

$$I_d = \frac{U_H - U_L}{U_H - U_L} (U_{doi} \cos \gamma_0 - d_{xi} I_{dord}) + I_{L0} \quad (9)$$

将其代入式(8)中的 I_{dN} , 即可得到 VDCOL-CEA 控制模式下的逆变器无功需求特性

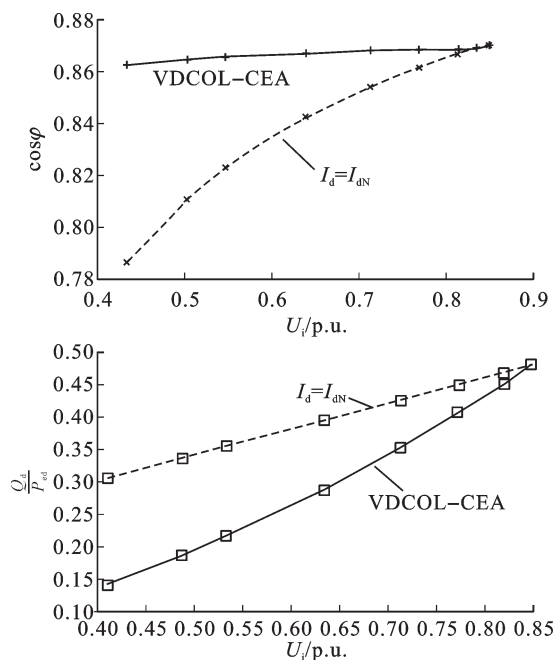
$$Q_d = f(U_i, I_{dord}) \quad (10)$$

即 Q_d 是关于 U_i 与 I_{dord} 变化的函数。在该控制模式下, 直流系统可利用的变化对逆变器无功需求进行调节, 其调节特性见图 5。从图 5 可以看出, 在该控制模式中减小 I_{dord} 相比定 I_{dN} , 可以维持逆变器处于较高的功率因素, 从而使无功需求随直流功率的下降而快速下降。

2.4 I_{dmin} -CEA 控制模式及 4 种控制模式的关系

逆变侧交流母线电压大幅度跌落, 使直流电压低于 U_L 时, 整流侧进入定最小电流控制, 直流系统进入 I_{dmin} -CEA 控制模式, 运行点如图 2 中 D 所示。由于该控制模式中控制器的调节方式与 CC-CEA 模式相同, 均为整流侧定电流控制逆变侧定熄弧角控制方式, 因此 $I_d = I_L$ 将代入式(7)与式(8), 即可得到此阶段逆变器的运行特性及无功需求特性。

为了直观说明 4 种控制模式的转换关系以及其对无功功率的调节能力, 以文中的模型作分析, 4 种控制模式的关系见图 6。模式 A, 无功特性是关于的 U_i 、 γ 的函数, 电压下降时无功需求功率可由 γ 进行调节, 其控制面积的大小受熄弧角裕度的影响, 控制范围较小。模式 C, 无功功率由控制参数 I_{dord} 参与调节, 因此其控制面积由 VDCOL 段的控制范

图 5 VDCOL-CEA 控制模式与 U_i 的关系Fig. 5 Reactive power characteristics of VDCOL-CEA control mode with U_i changes

围决定,通常会远大于模式 A。而模式 B 与模式 D,由于其无功特性只是关于 U_i 的函数,因而,可认为这两种控制模式是不具有无功调控能力的阶段。

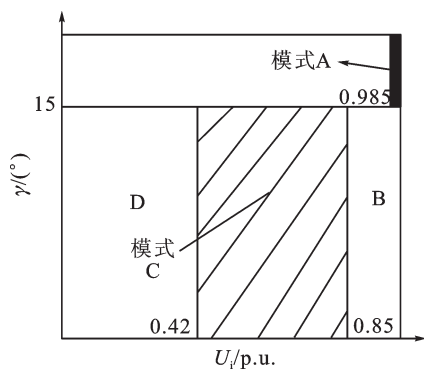


图 6 4 种控制模式的关系

Fig. 6 The relationship between four control modes

3 无功调节的影响因素分析

3.1 熄弧角裕度的影响

利用熄弧角调节逆变器无功功率的控制模式,由于受最小熄弧角的限制,如图 6 模式 A 所示,控制面积通常较小,无功调节的能力也就有限。根据文[22]提出的临界换相电压降指标,可知在保障无换相失败的情况下,模式 A 的调节范围与熄弧角裕度关系为

$$\Delta U = 1 - \frac{2I_d}{2I_{dN} + U_i(\cos\gamma_{\min} - \cos\gamma)/X_c} \quad (11)$$

式(11)中: ΔU 为 A 模式控制下逆变侧换流母线

的临界电压降; I_d 为临界电压降所对应的直流电流。可见正常运行时, γ 角设置的越大,逆变站临界电压降则相应增大,扩大了模式 A 的控制范围。

不同熄弧角的初始条件下,逆变器功率因素随 U_i 变化的曲线见图 7。当 $\gamma=18^\circ$ 时,模式 A 的控制范围是运行电压从 1.0 p.u. 至 0.985 p.u.,临界电压降为 0.015 p.u.;当 $\gamma=22^\circ$ 时,临界电压降增至为 0.04 p.u.。可见增大 γ 角裕度等同于扩大模式 A 的运行范围,增强直流控制对无功功率的调节能力。但同时看到,增大 γ 裕度具有降低稳定运行时逆变器的功率因素,增加无功补偿容量的缺陷。因此利用 γ 裕度调节无功,需考虑直流系统运行的经济情况进行合理设置[19,23]。

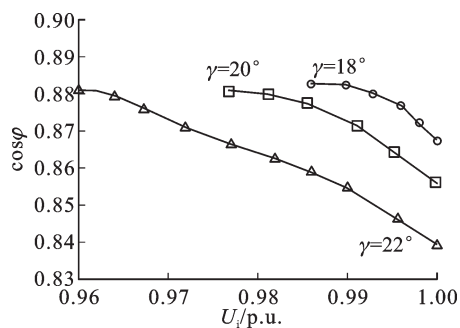


图 7 不同熄弧角条件下模式 A 的调节特性

Fig. 7 Regulating characteristics under the condition of different extinction angle mode A

3.2 VDCOL 控制参数的影响

如图 2, VDCOL 的控制参数决定了 U_d-I_d 的斜线段特性,当调整 U_H 、 U_L 、 I_H 、 I_L 中任一参数时,均能改变其对 I_d 的控制特性,继而影响控制模式 C 的无功调节能力。按照表 2 修改 VDCOL 的启动电压 U_H 与最小电流 I_L 后,控制模式 C 的调节特性对比曲线见图 8。

表 2 VDCOL 控制参数

Table 2 VDCOL control parameters

VDCOL	U_H /p.u.	I_L /p.u.
S_0	0.8	0.55
S_1	0.9	0.55
S_2	0.8	0.40

由图 8(a)可知,提高启动电压如曲线 S_1 ,或减小最小电流如曲线 S_2 ,均提高了控制模式 C 中逆变器的功率因素,增强了系统对无功功率的调节作用。其中,提高 U_H 能同等扩大模式 C 的控制范围,而减小 I_L 对低压时功率因素的调节作用更为明显。因此,优化 VDCOL 控制参数,能提高模式 C 对无功功率的调节能力。图 8(b)中,改变 VDCOL 控制参数时,系统有功功率与对应的无功呈同等变化趋势,由此

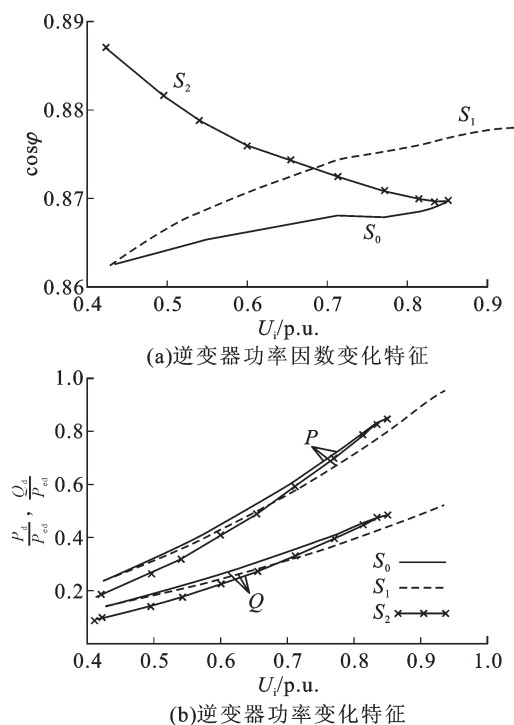


图 8 不同 VDCOL 控制参数下模式 C 的调节特性

Fig. 8 The regulation characteristics of different VDCOL control parameters under mode C

可知,该控制模式是以牺牲有功功率的传输以减缓无功需求,因此在实际直流工程中,对于 VDCOL 参数设置应充分考虑系统整体的协调控制,缓解无功需求的同时避免有功功率失衡^[5-6]。

3.3 状态量 γ 、 I_d 调节速度的影响

考虑系统暂态变化过程时,各状态量的调节速度主要取决于 PI 控制器。通常控制器的动态调节性能越好,各控制模式对无功功率的调节效果就越好。为了加快 PI 控制器的调控速度、快速消除稳态误差,文中在状态量 I_d 、 γ 进入 PI 调节器前分别加入了分段比例模块 K 见图 9。

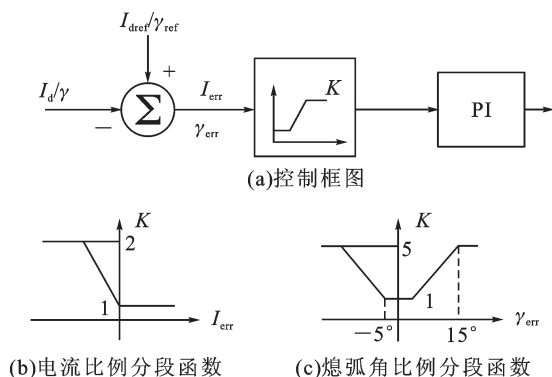


图 9 分段比例模块

Fig. 9 The segment ratio module

如图 9(a),当产生瞬时过电流时, I_{err} 为负,设置比例系数 K 在指定范围内与过电流增加呈线性增大的关系,如图 9(b)所示。这相当于增大了 PI 控制

器的偏差量,从而加速 I_d 的回落。 γ 分段函数如图 9(c)所示,当 γ_{err} 为正且不断增加时,意味着换相失败风险增大,对偏差量进行 K 倍放大,促使熄弧角快速提高;而 γ_{err} 为负且不断减小时,意味着控制超调使角度 γ 过大,增加 PI 负的输入量可以加快减小熄弧角。

按照上述调整方案,设置逆变侧换流母线电压发生三相金属接地故障,持续时长 0.1 s 后恢复。逆变器无功需求特性见图 10。

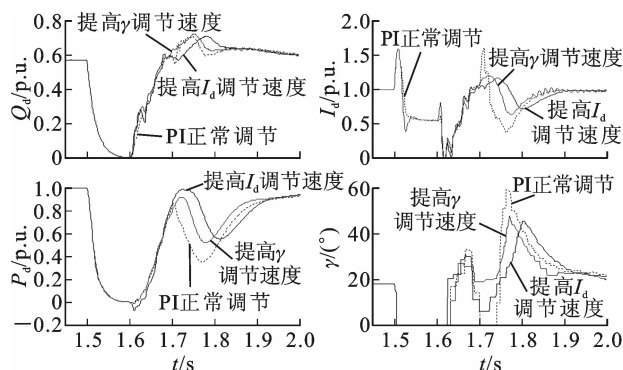


图 10 状态量调节速度对无功特性的影响

Fig. 10 Regulating speed of the status parameters effects on reactive characteristics

如图 10 所示,直流恢复过程中过电流会引起快速增加,由于弱受端系统动态无功缺乏使电压支撑不足,造成了逆变器后继换相失败的发生。提高的调节速度后,过电流减小,避开了无功功率需求峰值,同时有利于有功的平稳恢复;而提高的调节速度后,有效地避免了换相失败以及熄弧角超调现象,对直流系统动态过程中的无功及有功恢复特性具有一定的改善作用。由此可知,提高状态量 γ 、 I_d 的调节速度,对控制系统的无功调节具有有利的影响。

4 结论

1)文中基于直流稳态响应分析了各控制模式下逆变器的无功需求特性。得出当直流系统处于 CC-CV 控制模式与 VDCOL-CEA 控制模式时,具有无功调节能力;而处于其余的控制模式时,逆变器无功特性仅取决于交流电压 U_i 不具备调节能力。

2)CC-CV 控制模式通过 γ 角调节无功功率,其调节能力受熄弧角裕度限制,控制范围小,仅限于 U_i 较高时;VDCOL-CEA 控制模式通过控制电流整定值大小调节逆变器无功功率,其控制能力由 VDCOL 参数决定,控制范围相比 γ 调节要广。

3)基于分段比例模块调节 PI 控制器的偏差量,

能够改善控制器的调节速度。通过提高直流状态量 γ 、 I_d 的调节速度,有利于减小逆变器无功功率需求及改善与弱系统相连直流的恢复特性。

参考文献:

- [1] 郑超,汤涌,马世英,等. 直流参与稳定控制的典型场景及技术需求[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3750-3759.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. A survey on typical scenarios and technology needs for hvdc participated into stability control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3750-3759.
- [2] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1993: 187-193.
- [3] 汪娟娟,张尧,夏成军,等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 30-34.
WANG Juanjuan, ZHANG Yao, XIA Chengjun, et al. Survey of studies on transient voltage stability of AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 30-34.
- [4] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12.
- [5] 罗曼,朱磊. 区域电网无功优化控制系统的研究和应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(6): 29-34.
LUO Man, ZHU Lei. Research and application of reactive power optimization and control system in regional grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(6): 29-34.
- [6] 江浩侠,黄伟,许亮,等. 高压配电网纯受端片区的无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(3): 18-22.
JIANG Haoxia, HUANG Wei, XU Liang, et al. Reactive power optimization of the receiving end area of high voltage distribution network[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(3): 18-22.
- [7] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 15-18.
LI Xingyuan. High voltage direct current transmission system[M]. Beijing: Science Press, 2010: 15-18.
- [8] 刘晓明,慈文斌,刘玉田. 直流控制方式对受端电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 69-73.
LIU Xiaoming, CI Wenbin, LIU Yutian. Influence of DC system control mode on voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 69-73.
- [9] 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 largedisturbance in hybrid AC/DC system[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 20-24.
- [10] 陈修宇,韩民晓,刘崇茹. 直流控制方式对多馈入交直流系统电压相互作用的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 58-63.
CHEN Xiuyu, HAN Minxiao, LIU Chongru. Impact of control modes on voltage interaction between multi-infeed AC-DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 58-63.
- [11] LEE R L, ZOLLMAN D, TANG J F, et al. Enhancement of AC/DC system performance by modulation of a proposed multiterminal DC system in the southwestern[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 3(1): 307-316.
- [12] ZHANG Yaoxuan, DU Zhaobin. Analysis of dynamic reactive power demand characteristics of inverter stations of multi-infeed HVDC[C]/IEEE PES 2013 Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). [S.l.]: IEEE, 2013: 1-5.
- [13] 殷威扬,文俊,刘洪涛,等. 葛—南直流输电工程无功及电压控制研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 62-66.
YIN Weiyang, WEN Jun, LIU Hongtao, et al. Research on the control of reactive power & AC voltage in Ge-Nan HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 62-66.
- [14] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 184-192.
LI Xingyuan. The operation and control of HVDC transmission system[M]. Beijing: Science Press, 1998: 184-192.
- [15] CRESAP R L, SCOTT D N, MITTELSTADT W A. Small-signal modulation of the pacific HVDC inter-tie[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1976, PAS-95(2): 536-541.
- [16] 郭小江,马世英,卜广全,等. 上海多馈入直流系统的无功控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 30-35.
GUO Xiaojiang, MA Shiyong, BU Guangquan, et al. Reactive power control strategy for Shanghai multi-infeed DC system[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 30-35.
- [17] 郑超,马世英,盛灿辉,等. 以直流逆变站为动态无功源的暂态电压稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6141-6149.
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHENG Canhui, et al. Transient voltage stability control based on the HVDC inverter station acting as dynamic reactive source[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6141-6149.
- [18] 郭小江,马世英,卜广全,等. 直流系统参与电网稳定控制应用现状及在安全防御体系中的功能定位探讨[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 116-123.
GUO Xiaojiang, MA Shiyong, BU Guangquan, et al. Present

(下转第 82 页)

- 式电流互感器的积分器技术[J]. 继电器, 2007, 35(3): 45-50.
- XIE Bin, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Technology in designing integrator of electronic current transducer based on Rogowski coil[J]. Relay, 2007, 35(3): 45-50.
- [13] 王 鹏, 罗承沐, 张贵新. 基于低功率电流互感器的电子式电流互感器[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 98-101.
- WANG Peng, LUO Chengmu, ZHANG Guixin. Electronic current transformer based on low-power current transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 98-101.
- [14] GB/T 20840.8—2007 互感器 第8部分: 电子式电流互感器[S]. 2007.
- GB/T 20840.8—2007 Instrument transformers, Part 8: Electronic current transformers[S]. 2007.
- [15] 任稳柱, 袁 渊, 杨忠州, 等. 电子式互感器稳态误差校验技术的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 64-68.
- REN Wenzhu, YUAN Yuan, YANG Zhongzhou, et al. Steady-state error calibration technology for electronic instrument transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 64-68.
- [16] 王 玲, 汪本进, 吴士普, 等. 电子式电流互感器暂态特性检测系统研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 86-91.
- WANG Ling, WANG Benjin, WU Shipu, et al. Study on transient characteristics test method of electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 86-91.
- [17] 康志林. 基于 Rogowski 线圈的电流互感器校验研究[J]. 电气传动自动化, 2008, 30(2): 48-50.
- KANG Zhilin. Research for verifying current transformer based on Rogowski coils[J]. Electrical Drive Automation, 2008, 30(2): 48-50.
- [18] 周永佳, 许灵洁, 李航康, 等. 发电机出口大电流互感器误差的现场测量方法[J]. 浙江电力, 2011, 30(11): 34-37.
- ZHOU Yongjia, XU Lingjie, LI Hangkang, et al. On-site error verification method for high current transformer of generator outlet[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(11): 34-37.
- 丁国成(1980—), 男, 高级工程师, 现主要从事变电设备、状态检修及带电检测专业技术管理工作。

(上接第 76 页)

- application situation of DC system participating in power system stability control and discussion on position of Its functions in security defense system [J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 116-123.
- [19] 浙江大学直流输电电研组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.
- HVDC Research Group of Zhejiang University. High voltage direct current transmission[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1985.
- [20] 郑 超, 汤 涌, 马世英, 等. 直流整流站动态无功特性解析及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4886-4896.
- ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Study on the dynamic reactive power characteristic of HVDC rectifier stations and optimization measures[J]. Power System Technology, 2014, 34(28): 4886-4896.
- [21] 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: 31-35.
- XU Zheng. Dynamic behavior analysis of AC/DC power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 31-35.
- [22] 袁旭峰, 文劲宇, 程时杰. 与弱交流系统相连接的 HVDC 系统临界换相电压降及逆变站的运行范围[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 24-30.
- YUAN Xufeng, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Research on critical conmutating voltage reduction and operating range of inverter connected a weak AC system[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 24-30.
- [23] 罗隆福, 雷园园, 李 勇, 等. 定熄弧角控制器对直流输电系统的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 97-103.
- LUO Longfu, LEI Yuanyuan, LI Yong, et al. Effects of constant arc extinguishing angle controller on HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2009, 21(5): 97-103.
- 李 妮(1991—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为高压直流输电。
- 李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制等。