

双端柔直输电系统的改进无差拍控制策略研究

张汀荃¹, 张汀荃¹, 张海龙¹, 顾佳易²

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210042;

2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:传统直流输电技术在功率调节速度、损耗、保护和控制等方面存在一定的不足。柔性直流输电系统的出现不仅解决了上述缺陷,而且具有功率独立可控、可向无源网络供电等优势,在新能源分布式发电、微电网等领域得到广泛应用。本文通过建立两端柔直数学模型,研究电压源型换流器(voltage source converter, VSC)控制策略。考虑传统无差拍控制运用于VSC换流器时具有控制延时以及电流闭环控制响应性差等问题,文中提出一种改进无差拍控制策略,通过预测 $k+2$ 时刻采样电流,解决上述缺陷。最后通过联合仿真,验证所提方法的正确性与可靠性。

关键词:柔性直流;数学模型;电压源型换流器;无差拍控制;联合仿真

中图分类号:TM721.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)04-0084-06

0 引言

随着环境污染的日益加重,风能、太阳能等分布式能源以环保、可再生、运行灵活等优点成为研究的热点,然而其缺点也非常突出,比如存在间歇性功率波动、远离用电中心、规模小比较分散。另外,我国人口在不断增长,城市用电量在不断上升,城区供电网络的改造扩容也变得日益重要^[1-2]。柔性直流输电技术(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)的出现很好地解决了上述难题。VSC-HVDC被大规模运用于实际工程,主要由电压源型换流器(voltage source converter, VSC)、PWM调制技术等为基础组成,在分布式能源并网、无源网络供电和城区供电改造等场合拥有不可替代的优势^[3-5]。

目前,国内外学者已对柔性直流输电技术进行了大量研究,主要集中于系统控制器设计、VSC控制策略。文献[6]建立了基于VSC柔性直流输电系统稳态模型,并设计由逆模型及PI控制器构成的非线性控制器。文献[7]针对系统所联结有源网络、无源网络,分别设计了有功功率、定电压控制器和定直流电压、定交流电压控制器。文献[8]为缩短多换流器之间状态切换过程,采用一种改进下垂控制策略,缩短了切换时间,保证了系统直流电压稳定和功率分配均衡。文献[9-10]设计了针对无源供电网络的定直流电压和定交流电压控制器,并通过仿真对各控制情况下工况进行了模拟。文献[11]采用无差拍控制对系统谐振进行抑制,但其结

合状态观测器进行系统设计,控制算法过于复杂,很难在实际系统中实现。

本文以两端柔直输电系统为研究对象,建立两端柔直数学模型,研究系统基本运行方式以及VSC控制策略。考虑传统无差拍控制运用于VSC换流器时具有控制延时以及电流闭环控制响应性差等问题,因此提出一种改进无差拍控制策略,通过预测 $k+2$ 时刻采样电流,解决上述缺陷。最后通过联合仿真,验证所提方法的正确性与可靠性。

1 两端柔直数学模型

如图1所示,两端柔直由换流站1、直流侧电容、换流站2依次连接构成,直流侧电容为系统提供稳定直流电压,保证有功、无功潮流流动,电抗器 X_{L1} 用以滤除整流端和逆变端输入、输出电流谐波。本文对系统进行分析时,为便于数学模型推导,忽略换流器并联损耗,换流器串联及其他损耗用等效电阻 R_i 表示^[12-16]。

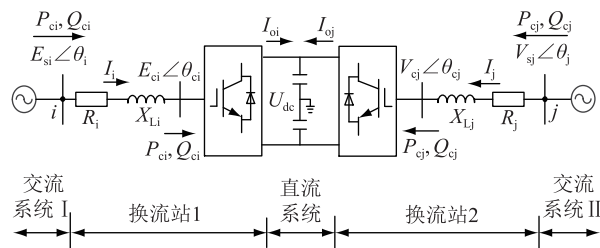


图1 两端柔直主电路结构

Fig.1 VSC-HVDC main circuit structure

1.1 三相坐标系下两端柔直数学模型

根据图1,对柔性背靠背直流输电系统列KCL方程,可得其在三相静止坐标系下的动态微分方程:

收稿日期:2018-02-27;修回日期:2018-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707089)

$$\begin{cases} L \frac{di_{j1}}{dt} + Ri_{j1} = E_{sj} - E_j \\ L \frac{di_{j2}}{dt} + Ri_{j2} = V_j - V_{sj} \end{cases} \quad (j = a, b, c) \quad (1)$$

式中: i_{j1} , i_{j2} 分别为交流系统输入、输出电流; E_{sj} , V_{sj} 分别为交流系统输入、输出电压; E_j , V_j 分别为换流器 1、换流器 2 交流侧输入、输出电压。

由于换流器 1 和换流器 2 结构参数对称, 故只对换流器 1 三相桥臂开关函数进行定义:

$$\begin{cases} m_{a1} = s_a - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} s_j \\ m_{b1} = s_b - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} s_j \\ m_{c1} = s_c - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} s_j \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$\begin{cases} L \frac{di_{j1}}{dt} + Ri_{j1} = E_{sj} - u_{dc} m_{j1} \\ L \frac{di_{j2}}{dt} + Ri_{j2} = u_{dc} m_{j2} - V_{sj} \end{cases} \quad (j = a, b, c) \quad (3)$$

图 1 可得直流侧电压方程为:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{o1} - i_{o2} = (m_{a1}i_{a1} + m_{b1}i_{b1} + m_{c1}i_{c1}) - (m_{a2}i_{a2} + m_{b2}i_{b2} + m_{c2}i_{c2}) \quad (4)$$

式中: u_{dc} 为直流侧电压; i_{o1} , i_{o2} 为直流侧输入或输出电流。假设忽略换流器开关损耗, 可得:

$$\begin{cases} P_{c1} = E_a i_{a1} + E_b i_{b1} + E_c i_{c1} = \\ u_{dc}(m_{a1}i_{a1} + m_{b1}i_{b1} + m_{c1}i_{c1}) = u_{dc}i_{o1} \\ P_{c2} = V_a i_{a1} + V_b i_{b1} + V_c i_{c1} = \\ u_{dc}(m_{a2}i_{a2} + m_{b2}i_{b2} + m_{c2}i_{c2}) = u_{dc}i_{o2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{c1} , P_{c2} 分别为换流器 1、换流器 2 交流输出或输入有功功率。当直流侧 u_{dc} 保持恒定时, 系统处于稳定运行状态, $i_{o1} = i_{o2}$, 则 $P_{c1} = P_{c2}$, 即流入功率等于流出功率。可得结论: 要实现柔性背靠背两侧功率的平衡, 需保证直流侧电压的稳定。

式(3)构成了两端柔直系统数学模型, 式(4)构成了直流侧电压的数学模型, 式(3)与式(4)构成两端柔直系统在三相静止坐标系下的数学模型。

由于三相静止坐标系下参数均为变交流量, 不利于系统控制与设计, 所以需将两端柔直数学模型转化到同步旋转的 dq 坐标系下, 将三相静止坐标系下的正弦变量转化为同步坐标下的直流量。

1.2 dq 坐标系下两端柔直数学模型

根据式(3)、(4)建立两端柔直在 dq 同步旋转坐标系下的数学模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_1 \\ -\omega_1 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{u_{dc}m_{d1} - E_{sd}}{L} \\ \frac{u_{dc}m_{q1}}{L} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_2 \\ -\omega_2 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{V_{sd} - u_{dc}m_{d2}}{L} \\ -\frac{u_{dc}m_{q2}}{L} \end{bmatrix} \quad (7)$$

直流侧电压在 dq 旋转坐标下的方程为:

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{m_{d1}i_{d1} + m_{q1}i_{q1}}{C} - \frac{m_{d2}i_{d2} + m_{q2}i_{q2}}{C} \quad (8)$$

式中: ω_1 , ω_2 为交流系统相电压的角频率; i_{d1} , i_{d2} , i_{q1} , i_{q2} 为交流系统三相交流电流在 dq 轴上的分量; E_{sd} , V_{sd} 为两端交流系统三相电压在 d 轴上的分量; m_{d1} , m_{d2} , m_{q1} , m_{q2} 为换流器开关函数在 dq 轴上的分量。式(6—8)共同构成两端柔直系统在 dq 旋转坐标系下的数学模型。

2 基于改进无差拍系统运行分析

2.1 传统无差拍控制策略

无差拍控制综合了系统状态方程、系统输出反馈方程以及所要求的下一时刻参考输出方程最终计算出系统所需的开关脉冲。与其他 VSC 控制策略相比, 具有开关频率固定、动态响应快和高带宽特性等优点, 在实际中得到了广泛的应用^[17]。

在数字系统中, 为实现无差拍的控制效果, 需将系统下一时刻参考输出量表示为系统状态变量与输出反馈变量之间的相互关系。根据式(6)、(7), 由于 $\alpha\beta$ 轴上方程对称, 仅以 α 轴为例, 可得 α 轴无差拍控制框图, 见图 2。图中 $G_{pwm}(z)$ 是 PWM 调制环节传递函数, $G_p(z)$ 是被控对象传递函数。

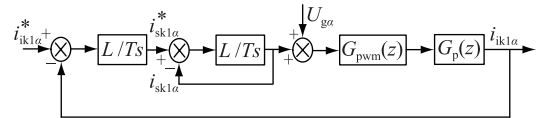


图 2 α 轴无差拍电流控制框图

Fig.2 Block diagram of current loop with deadbeat control

由图 2 可知, 传统无差拍电流控制实际上已经成为了差一拍控制, 无法实现无静差跟踪。且受限于系统硬件及控制器容量, 系统采样率不能过高。同时考虑系统运用环境, 需要更高的控制精度及响应速率。因此, 传统无差拍控制已不能满足实际工程应用要求, 需进行改进, 提高控制效果^[18]。

2.2 改进无差拍控制策略

由于实际控制器存在采样率、计算能力等限制,传统无差拍无法实现采样、计算、占空比输出在同一时刻完成,总会存在采样点超前占空比输出点的情况。图3是控制延时示意图,图中在第 k 时刻开始,系统仍执行的是 $k-1$ 时刻PWM占空比 D_{k-1} ,而上一时刻的占空比 D_k 延时 t_d 才输出。为进一步提高无差拍控制精度,修正由以上原因造成的周期性偏差,改进算法通过预测第 $k+2$ 时刻的电流,这样PWM占空比 D_{k+1} 可以在第 $k+1$ 时刻提前执行,实现电流无静差跟踪。由于 $\alpha\beta$ 轴上方程是对称的,仅以 α 轴为例,可得 α 轴改进无差拍控制框图,如图4所示,其中S为补偿器,用于被控对象相位补偿。

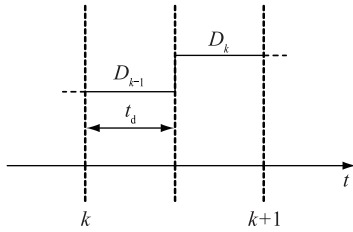


图3 控制延时示意图

Fig.3 Sketch map of control delay

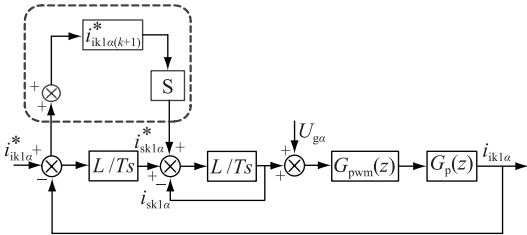


图4 α 轴改进无差拍控制框图

Fig.4 Block diagram of current loop with improvement deadbeat control

由式(6)、(7)推算下一时刻电流值,忽略系统电容的影响,默认电流 $i_{ik1} = i_{sk1} = i$,则第 $k+2$ 时刻的 α 轴电流采样值为:

$$i_{\alpha}(k+2) = [u_{\alpha}(k+1) - U_{g\alpha}(k+1)] \frac{T_s}{L} + i_{\alpha}(k+1) \quad (9)$$

根据式(6)、(7)及式(9)可得第 k 时刻和第 $k+1$ 时刻 α 轴的电流偏差值:

$$\Delta i_{\alpha}(k) = i_{\alpha}(k+1) - i_{\alpha}(k) = \frac{T_s}{L} [u_{\alpha}(k) - U_{g\alpha}(k)] \quad (10)$$

$$\Delta i_{\alpha}(k+1) = i \frac{T_s}{L} [u_{\alpha}(k+1) - U_{g\alpha}(k+1)] \quad (11)$$

令第 $k+1$ 时刻 α 轴的电流误差等价于2个相邻时刻电流误差的平均值,表达式为:

$$\Delta i_{\alpha}(k+1) = \frac{1}{2} [\Delta i_{\alpha}(k) + \Delta i_{\alpha}(k+1)] = \frac{1}{2} [i_{\alpha}(k+2) - i_{\alpha}(k)] \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),可得系统交流侧输出电压表达式:

$$u_{\alpha}(k+1) = U_{g\alpha}(k+1) + \frac{L}{2T_s} [i_{\alpha}(k+2) - i_{\alpha}(k)] \quad (13)$$

相对于电网基频而言,如果采样周期较小,可以认为在 α 轴上网侧电压在连续3个采样时刻采样偏差相等,表达式为:

$$U_{g\alpha}(k+1) - U_{g\alpha}(k) = U_{g\alpha}(k) - U_{g\alpha}(k-1) \quad (14)$$

由式(14)可知,在第 $k+1$ 时刻的电网电压平均值可由前几个采样值的线性外推得到,表达式为:

$$U_{g\alpha}(k+1) = U_{g\alpha}(k) + [U_{g\alpha}(k+1) - U_{g\alpha}(k)] = 2U_{g\alpha}(k) - U_{g\alpha}(k-1) \quad (15)$$

假如网侧电压在连续4个采样时刻采样间隔也相等,即:

$$U_{g\alpha}(k+2) - U_{g\alpha}(k+1) = U_{g\alpha}(k+1) - U_{g\alpha}(k) = U_{g\alpha}(k) - U_{g\alpha}(k-1) \quad (16)$$

由式(15)、(16)可得第 $k+1$ 时刻网侧电压为:

$$U_{g\alpha}(k+1) = U_{g\alpha}(k) + [U_{g\alpha}(k+1) - U_{g\alpha}(k)] + \frac{U_{g\alpha}(k+2) - U_{g\alpha}(k+1)}{2} =$$

$$\frac{5}{2}U_{g\alpha}(k) - \frac{3}{2}U_{g\alpha}(k-1) \quad (17)$$

式(13)中第 $k+2$ 时刻采样电流为 k 采样时刻的给定值,表达式为:

$$i_{\alpha}(k+2) = i^* \quad (18)$$

根据以上分析,利用式(15)、(17)和式(18)可得 $U_{g\alpha}(k+1)$ 和 $i_{\alpha}(k+2)$,将以上两个结果代入式(13),得到第 $k+1$ 时刻两端柔直系统交流测输出电压 $u_{\alpha}(k+1)$,最后通过计算 $u_{\alpha}(k+1)$ 与逆变器高压侧电压 U_{dc} 的比值,得到逆变器所需的PWM占空比 D_{k+1} 。

本节所提改进无差拍控制策略优点在于:(1)式(13)与式(6)、(7)相比,电流不会突变,同时电流偏差减少1/2,有限改善电流波形质量;(2)无需计算 $k+2$ 电流,将 k 时刻电流值与 $k+1$ 时刻电流值直接关联;(3)改善系统输出电流波形,减少电流总谐波失真(total harmonic distortion, THD)^[19]。但改

进算法默认连续采样时间间隔一致,因此一般适用于稳态环境,对于暂态环境还有待于进一步改善。

3 仿真验证及分析

为验证上文所提方法,搭建仿真系统,检验上述所提算法的正确性与有效性。系统主电路参数选取可参考文献[20],其中各器件具体参数如表1所示。

表1 系统主电路参数

Tab.1 Parameters of main circuit system

器件	参数值
直流母线电容/ μF	600
逆变器侧电感/ mH	6
整流器侧电感/ mH	6
DC/AC 模块/ kHz	20
AC/DC 模块/ kHz	20

3.1 仿真平台构建

本节所采用联合仿真平台将由 NI Labview 2014 sp1 与 Starsim 软件共同构成。其工作原理如下, Labview 2014 sp1 负责数据采集、改进无差拍控制策略、两端并网控制器、向无源网络供电控制器等程序的编写; Starsim 负责搭建背靠背柔性直流输电系统主电路包括 2 个电压源型换流器、2 个变压器、2 个电感以及 2 个交流配电网。在上位机中,通过桌面执行节点控件以及 Starsim Design 调用仿真程序、系统主电路,最终形成一个完整的仿真平台。

3.2 仿真结果分析

如图 5 所示,采用传统 VSC 三角波控制策略,利用 NI 控制器中高斯白噪声模块,在指令电流中加入指定谐波信号以模拟复杂的电网环境,在采用上述策略时,可以看出网侧电流发生明显畸变,图 6 利用快速傅里叶变换对此时网侧电流分析,图中 3 至 7 次谐波含量明显高于其余各次谐波之和,系统产生大量谐波,严重危害配电网运行。

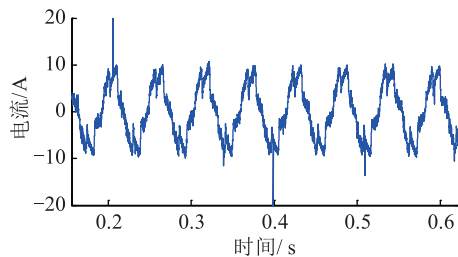


图5 采用三角波控制时网侧电流波形
Fig.5 The grid side current waveform of untaken measures

如图 7 所示,采用了传统无差拍控制策略,相比于图 5,网侧电流波形趋于正弦,图 8 是此时网侧电

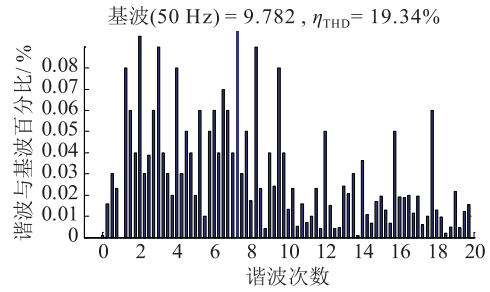


图6 采用三角波控制时网侧电流 THD
Fig.6 The grid side current waveform THD of untaken measures

流 THD,图中 3 至 7 次谐波含量降低,3 至 7 次谐波补偿率为 60%,但仍较高,配电网运行仍受到危害。

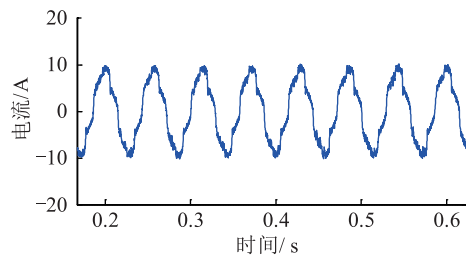


图7 采用传统无差拍后网侧电流波形
Fig.7 The grid side current waveform of adopt tradition deadbeat

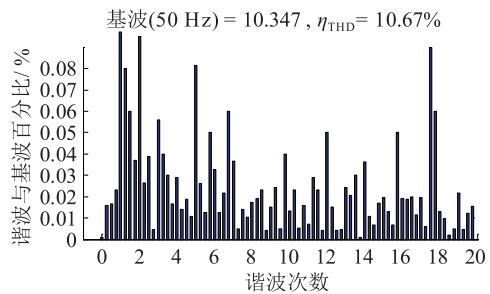


图8 采用传统无差拍后网侧电流 THD
Fig.8 The grid side current waveform THD of adopt tradition deadbeat

如图 9、10 所示,采用改进无差拍控制策略,从图 10 中看出,此时网侧电流 THD 为 3.69%,图中 3 至 7 次谐波都得到有效抑制,3 至 7 次谐波补偿率达到 95%,系统运行安全性得到大大改善。

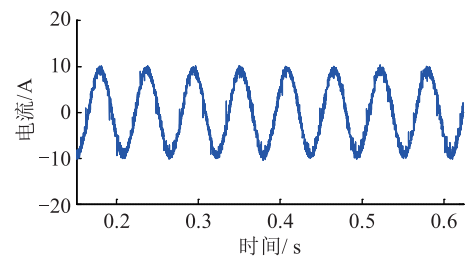


图9 采用改进无差拍后网侧电流波形
Fig.9 The grid side current waveform of adopt improvement deadbeat

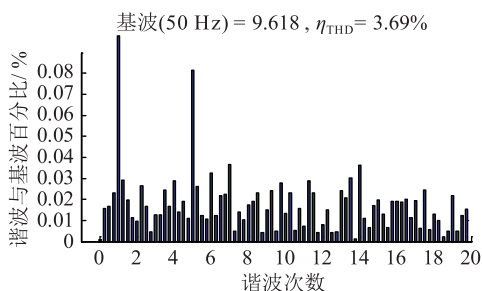


图 10 采用改进无差拍后网侧电流 THD

Fig.10 The grid side current waveform THD of adopt improvement deadbead

4 结语

文中以两端柔直输电系统为研究对象,建立两端柔直数学模型,研究系统基本运行方式以及电压源型换流器控制策略。考虑传统无差拍控制运用于 VSC 换流器时具有控制延时以及电流闭环控制响应性差等问题,提出一种改进无差拍控制策略,通过预测 $k+2$ 时刻采样电流,解决上述缺陷。最后通过联合仿真,验证了所提方法的正确性与可靠性。未来可将文中所提改进方法与其他电能质量治理策略相结合,不仅拓宽了上述方法适用范围,而且可以进一步提高系统稳定性。

参考文献:

- [1] 徐 政. 高压直流输电与柔性直流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
XU Zheng. HVDC and FACTS controllers: applications of static converters in power systems [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [2] CETIN A, ERMIS M. VSC based D-STATCOM with selective harmonic elimination[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(3): 1000-1015.
- [3] ABB Co., Ltd. The ABCs of HVDC transmission technology[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(2): 32-44.
- [4] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Interconnection of two very weak AC system by VSC-HVDC links using power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 344-355.
- [5] FLOURENTZOU N, AGEIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission system: an-overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [6] 张桂斌, 徐 政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 18-23.
ZHANG Guibin, XU Zheng, WANG Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CESS, 2002, 22(1): 18-23.

- [7] 尹 明, 李庚银, 牛同义, 等. VSC-HVDC 连续时间状态空间模型及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 34-39.
YIN Ming, LI Gengyin, NIU Tongyi, et al. Continuous-time state-space model of VSC-HVDC and its control strategy [J]. Proceedings of the CESS, 2005, 25(18): 34-39.
- [8] 孙黎霞, 陈 宇, 宋洪刚, 等. 适用于 VSC-MTDC 的改进直流电压下垂控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1037-1043.
SUN Lixia, CHEN Yu, SONG Honggang, et al. Improved voltage droop control strategy for VSC-MTDC [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1037-1043.
- [9] 梁海峰, 李庚银, 李广凯, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 45-50.
LIANG Haifeng, LI Genyin, LI Guangkai, et al. Simulation study of VSC-HVDC system connected to passive network [J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 45-50.
- [10] MOHAMED Y. Suppression of low-and high-frequency instabilities and grid-induced disturbances in distributed generation inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 16(12): 3790-3803.
- [11] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in china [J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [12] 林家生. 高压直流输电 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 16-17.
LIN Jiasheng. High voltage direct current transmission [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982: 16-17.
- [13] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 26(1): 378-384.
- [14] 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): 79-83, 83.
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, 83.
- [15] 郭利娜, 刘天琪, 李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 95-99.
GUO Lina, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 95-99.
- [16] 麦国浩, 李海锋, 郭彦勋, 等. 背靠背直流输电的交流电网故障计算模型研究[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 94-101.
MAI Guohao, LI Haifeng, GUO Yanxun, et al. Research on fault calculation model for AC power grid with back-to-back HVDC transmission [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 94-101.

- [17] 周娟, 秦静, 王子绩, 等. 内置重复控制器无差拍控制在有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 233-238.
- ZHOU Juan, QIN Jing, WANG Ziji, et al. Application of deadbeat control with plug-in repetitive controller in active power filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 233-238.
- [18] 杨勇, 阮毅, 叶斌英, 等. 三相并网逆变器无差拍电流预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 40-46.
- YANG Yong, RUAN Yi, YE Binying, et al. Deadbeat predictive current control method for three-phase grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 40-46.
- [19] 陈珩, 陈怡, 万秋兰, 等. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- CHEN Heng, CHEN Yi, WAN Qiulan, et al. Steady-state analysis of electric power system[M]. Beijing: China Electric

Power Press, 2015.

- [20] 宁大龙, 同向前, 尹军. 柔性直流输电系统的设计及运行特性实验[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6042-6049.
- NING Dalong, TONG Xiangqian, YIN Jun. Design and laboratory test of HVDC system based on voltage source converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6042-6049.

作者简介:



张汀荃

张汀荃(1997—),女,本科,专业为电气工程及其自动化(E-mail: 632490383@qq.com);

张汀荃(1997—),女,本科,专业为电气工程及其自动化;

张海龙(1988—),男,博士,讲师,研究方向为智能微电网技术。

Operation Characteristics of Improved Deadbeat Flexible HVDC Transmission

ZHANG Tingquan¹, ZHANG Tinghui¹, ZHANG Hailong¹, GU Jiayi²

(1. Nari School of Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: There are obvious defects in the traditional HVDC technology in power regulating speed, reduce the loss, protection and control, has been unable to meet the electricity demand diversity. Emergence of VSC-HVDC not only solves the defects, but also has the power of independent controllable and has the advantage to supply power to a passive network etc, widely used in power generation, new energy and other fields of distributed micro grid. In this paper, double end DC is taken as the research object, and the mathematical model of both ends flexible and straight is set up. On this basis, the basic operation mode of the system and the control strategy of the voltage source type (VSC) converter are studied. Considering the control delay of the VSC converter and the poor responsiveness of the current closed loop control, an improved deadbeat control strategy is proposed to solve the above defects by predicting the $k+2$ time sampling current. Finally, the correctness and reliability of the above methods are verified by CO simulation.

Key words: VSC-HVDC; mathematical model; voltage source converter; deadbeat control; union simulation

(编辑 方 晶)