

基于 P-DPC 的多端直流输电控制策略

江斌开¹,王志新¹,陆斌锋²,史 莉³

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240;2. 嘉兴清源电气科技有限公司,浙江 嘉兴 314031;
3. 上海纳杰电气成套有限公司,上海 201111)

摘要: 在 MATLAB/Simulink 平台搭建了三端并联型电压源换流器型多端直流输电(VSC-MTDC)仿真模型,分别设计了基于预测-直接功率控制(P-DPC)的本地控制器和协调控制器。当某个变流站发生扰动甚至退出时,由主导变流站进行功率补偿,若主导变流站达到功率出额上限,具有功率调节的变流站切换运行模式,自动承担缺额功率,保证系统稳定运行。各个变流站工作相对独立,提高了系统稳定性。仿真表明所设计的控制器简单,控制效果相对于传统双闭环控制策略更好。

关键词: 电压源换流器型多端直流输电; 预测-直接功率控制; 本地控制; 协调控制; MATLAB; 稳定性; 高压直流输电; 控制

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.003

0 引言

随着传统能源的消耗殆尽,新能源越来越受到人们的关注,而海上风电则因其诸多优点而倍受青睐。目前,大型海上风电场的远距离传输通常采用基于电压源换流器型高压直流输电(VSC-HVDC)的系统^[1-2]。在双端高压直流输电的基础上,多端直流输电(MTDC)技术逐渐完善并得以应用^[3-4]。MTDC 系统至少包含 3 个或 3 个以上的变流站。由于电力传输的迅速发展,传统的双端高压直流输电已逐渐不能满足要求,MTDC 越来越受到人们重视。世界上第一个多端柔性直流输电示范工程——广州南澳±160 kV 多端柔性直流输电示范工程,在青澳、金牛与塑城变流站之间完成了三端变流站及系统成功试运行,促进了多端柔性直流输电技术在我国的应用。

与双端高压直流系统相比,MTDC 系统除了需要考虑各个变流站自身的控制之外,还要考虑各个变流站之间的协调控制。新能源的传输、分布式电源、无源负荷都可以通过 MTDC 系统联系在一起,采用有效的控制策略对电压源换流器型多端直流输电(VSC-MTDC)系统的稳定运行至关重要。文献[5]提出了一种直流功率调制技术,使得 MTDC 系统能更灵活地向所连接的交流系统提供快速的紧急功率支持,但所连接交流系统的强度、各变流站的控制策

略和直流系统电流平衡原则的选取会极大地影响直流功率调制的性能,容易造成系统不稳定。文献[6]对海上风电 VSC-MTDC 提出了基于直流电压的下垂控制,可以控制 MTDC 系统的电压稳定,但在系统发生故障时,引入频率信号,将 MTDC 直流电压反映的功率不平衡量转变为频率的形式,控制策略稍显复杂。文献[7]提出了采用基于直流电压偏差控制的多点直流电压控制策略,能实现定有功功率控制模式与定直流电压控制模式之间的自动转换,但要求充当主导站的变流站有足够大的后备容量以完全补偿系统功率的不平衡。文献[8]提出带电压下降特性的控制方式,可以提高整个多端系统的功率调节能力,但直流电压质量差,对于单个变流器无法实现定有功控制。

本文针对 VSC-MTDC 系统分别设计了基于预测-直接功率控制 P-DPC (Predictive-Direct Power Control)的本地控制器和协调控制器。P-DPC 原理不复杂,控制方法简单有效,不需要传统的电压、电流控制器,充分利用了离散化数学模型,计算简单,容易数字化实现。采用该控制策略,可以实现各个变流站之间的功率协调,另一方面可以有效简化控制策略,不影响系统运行的稳定性。某个变流站发生扰动甚至退出时,由主导变流站进行功率补偿,若主导变流站达到功率出额上限,具有功率调节的变流站切换运行模式,自动承担缺额功率,保证系统稳定运行。利用 MATLAB/Simulink 搭建 VSC-MTDC 系统和控制模型,验证了所设计控制器的有效性和合理性。

1 VSC-MTDC 系统建模

1.1 VSC-MTDC 系统结构

MTDC 变流站之间不同的连接方式可以组成不

收稿日期:2015-01-07;修回日期:2015-12-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2014AA052005);国家自然科学基金资助项目(51377105);嘉兴市科技计划项目(2014BZ15002);上海市闵行区产学研合作计划项目(2014MH103)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2014AA-052005), the National Natural Science Foundation of China (51377105), Science & Technology Program of Jiaxing, China (2014BZ15002) and Science & Technology Program of Minhang District, Shanghai (2014MH103)

同的拓扑结构,每种拓扑可以根据具体问题进行不同的设计。图 1、图 2 分别为 VSC-MTDC 系统的 2 种常用接线方式,即环状接线和树形状接线,本文仿真模型采用的是树形状接线。

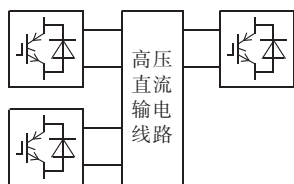


图 1 环状接线图

Fig.1 Ring connection

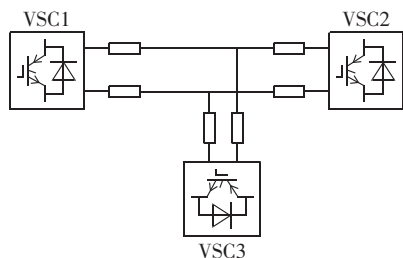


图 2 树形状接线图

Fig.2 Tree connection

1.2 三相 VSC 数学建模

由于系统整流器与逆变器的结构相似,因此以并网逆变器为例,推导相应的数学模型。图 3 为三相并网逆变器^[9-10]。

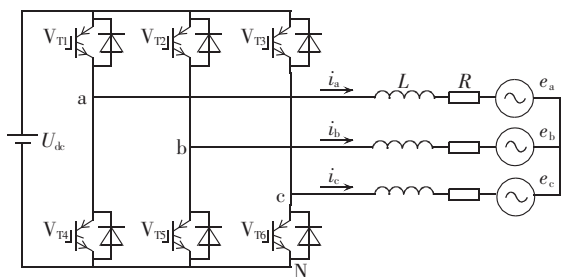


图 3 三相 VSC 并网逆变器

Fig.3 Three-phase grid-connected inverter based on VSC

如图 3 所示,三相并网逆变器包含 6 个开关,可以将开关状态定义如下:

$$S_a = \begin{cases} 1 & V_{T1} \text{ 闭}, V_{T4} \text{ 断} \\ 0 & V_{T4} \text{ 闭}, V_{T1} \text{ 断} \end{cases} \quad (1)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & V_{T2} \text{ 闭}, V_{T5} \text{ 断} \\ 0 & V_{T5} \text{ 闭}, V_{T2} \text{ 断} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & V_{T3} \text{ 闭}, V_{T6} \text{ 断} \\ 0 & V_{T6} \text{ 闭}, V_{T3} \text{ 断} \end{cases} \quad (3)$$

则上述开关函数的合成矢量为:

$$\mathbf{S} = S_a + \alpha S_b + \alpha^2 S_c \quad (4)$$

其中, $\alpha = e^{j2\pi/3}$ 。

则三相 VSC 的输出电压矢量可以计算得出:

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{S} \mathbf{U}_{dc} \quad i=0,1,2,\dots,7 \quad (5)$$

考虑 6 种开关状态的所有组合,可以得到总共 8 种电压矢量,其中 $\mathbf{U}_0 = \mathbf{U}_7$,如图 4 所示。

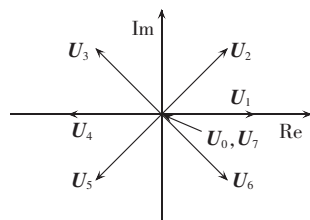


图 4 三相 VSC 的电压矢量

Fig.4 Voltage vectors of three-phase VSC

结合开关状态与直流电压,可以计算出三相 VSC 的输出电压,经过坐标变换得到:

$$\begin{cases} U_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} \left(S_a - \frac{S_b + S_c}{2} \right) \\ U_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (6)$$

如图 3 所示,可由基尔霍夫电流定律得到如下暂态电流方程:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{U_{aN} - e_a}{L} - \frac{R}{L} i_a \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{U_{bN} - e_b}{L} - \frac{R}{L} i_b \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{U_{cN} - e_c}{L} - \frac{R}{L} i_c \end{cases} \quad (7)$$

假设三相电网平衡,上述暂态电流方程经过坐标变换得到如下方程:

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = U_\alpha - e_\alpha - R i_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = U_\beta - e_\beta - R i_\beta \end{cases} \quad (8)$$

2 VSC-MTDC 的控制方法

VSC-MTDC 系统由于连接了多个变流站,因此对于 MTDC 的控制也变得更加复杂,目前 MTDC 的控制系统一般由两部分组成,分别是本地控制和上层控制^[8-9]。

a. 本地控制接受上层控制的指令,根据不同的电压、电流指标对本地变流器进行控制。

b. 上层控制采集各变流器的电流值或功率值,然后将计算出的代数和,再根据系统的控制要求或优化方案,按照一定的比例分配给各变流器(包括主变流器),作为运行参考设定值。

由于 MTDC 系统包含有多个变流站,各变流站间的控制作用会相互影响,因此各变流站控制器的协调控制十分重要。其中功率之间的协调配合是系统能够稳定运行的基本前提^[11-12]。为防止个别变流站出现扰动或者退出运行,保证系统的稳定,各个变

流站之间必须进行功率协调。根据本地控制方法的不同,各个变流站的工作模式可以分为以下 3 种:直流电压控制模式、功率控制模式和交流电压控制模式,其工作特性如图 5 所示^[13-14]。图 5 中, U_d 为直流电压, P 为有功功率, U_{dm} 、 U_{dn} 分别为直流电压最大、最小偏差值, P_m 、 P_n 分别为最大、最小有功功率, U_{do} 为额定直流电压, P_{io} 为第 i 个变流站给定有功功率值, P_L 为负载消耗功率。

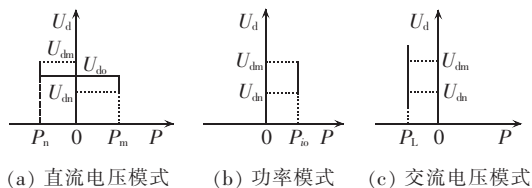


图 5 各控制模式下 VSC 变流站的工作特性

Fig.5 Working characteristics of VSC station for different control modes

2.1 变流器模型预测控制

模型预测控制技术由于其相对简单的控制原理和容易实现数字化等优点,在近年来受到广泛关注。对于变流器控制,可以理解为寻找合适的门极驱动信号去控制系统变量 $x(t)$,使其尽量接近所希望的参考变量 $x^*(t)$ 。模型预测控制只能在变量状态有限的情况下应用,通过全局寻优,找出最适合的控制驱动信号,将找到的最合适信号作为下一次控制的门极驱动信号。实际应用过程中,控制器计算时间与采样时间不可忽略,通过对系统变量 $x(t)$ 的暂态行为分析,离散化数学方程,可以得到系统变量上一时刻与下一时刻的联系,即预测函数 f 。一般情况下,预测函数可以得到多种结果,如何选取最优结果就涉及到价值函数的概念。一种典型价值函数为参考值 $x^*(t)$ 与预测值 $x_i(t_{k+1})$ 差的二次方,即 $g_i = [x^*(t) - x_i(t_{k+1})]^2$,除此之外还有采用参考值与预测值之差的绝对值作为价值函数。将得到的每一个预测值代入价值函数中,全局寻优对比,选择使价值函数 g_i 最小的控制行为^[15-17]。其具体过程如下^[18]:假设在 t_k 时刻,系统已准确控制,开关函数为 $S(t_k)$,系统变量为 $x(t_k)$ 。则 t_{k+1} 时刻的系统变量 $x_i(t_{k+1})$ 可通过预测函数 $f(x(t_k), S(t_k))$ 计算得出。设定以被控系统变量准确跟踪参考值为控制目标,即价值函数 g 的设定,则按上述预测函数可以得到价值函数最小的开关函数 $S(t_{k+1})$,将得到的新的开关函数应用到变流器控制上,重复上述过程。算法原理如图 6 所示。

本文设定被控系统变量为有功功率和无功功率,通过模型预测得出系统的有功功率与无功功率,根据价值函数直接给出变流器控制信号,即 P-DPC 方法。

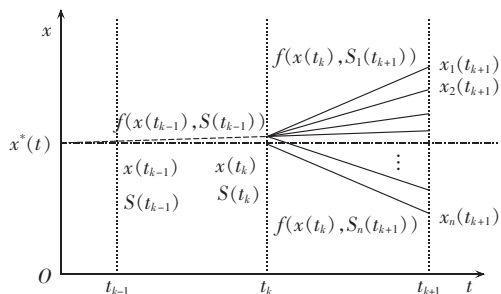


图 6 模型预测算法原理

Fig.6 Principle of MPC

2.2 逆变器侧控制器设计

基于 P-DPC 控制器设计分为如下步骤。

a. 离散化所得到逆变器数学模型,即将式(8)离散化,得到如下方程:

$$\begin{cases} i_{\alpha}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_{\alpha}(k) + \frac{T_s}{L} (U_{\alpha}(k) - e_{\alpha}(k)) \\ i_{\beta}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_{\beta}(k) + \frac{T_s}{L} (U_{\beta}(k) - e_{\beta}(k)) \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可知,经过离散化逆变器数学模型后,可以得到下一时刻的电流与上一时刻电流之间的联系,即可以从 k 时刻的电流预测出 $(k+1)$ 时刻的电流。经过旋转变换可得 dq 旋转坐标下的方程:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = i_{\alpha}(k+1) \cos \theta + i_{\beta}(k+1) \sin \theta \\ i_q(k+1) = -i_{\alpha}(k+1) \sin \theta + i_{\beta}(k+1) \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

其中, θ 为电网的空间角度; $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$ 分别为 k 时刻预测出的三相并网逆变器输出电流 d 轴、 q 轴分量。

假设电网稳定,则三相电压可认定为基本不变。这样就可以通过以下方程预测得出 $(k+1)$ 时刻的有功功率和无功功率。

$$\begin{cases} P(k+1) = e_d i_d(k+1) + e_q i_q(k+1) \\ Q(k+1) = e_q i_d(k+1) - e_d i_q(k+1) \end{cases} \quad (11)$$

b. 选定价值函数。结合价值函数最小原则与功率平衡,采用如下价值函数:

$$g = |Q^* - Q(k+1)| + |P^* - P(k+1)| \quad (12)$$

其中, P^* 与 Q^* 分别为给定的有功功率和无功功率参考值。利用价值函数式(12),通过全局寻优,可以反推出最接近期望功率的大小,从而可以得到该状态下的电压大小,再由式(6)可以得到最合适的开关状态。整个过程即为通过 P-DPC 给出开关矢量。

基于 P-DPC 控制策略的结构框图如图 7 所示。

2.3 整流侧控制器设计

整流侧变流器承担了稳定直流电压和提供系统功率的功能,因此,整流侧变流器必须采用定直流电压控制模式,控制直流电压和无功功率。由于与逆变器结构相似,不难得到整流侧 VSC 数学模型:

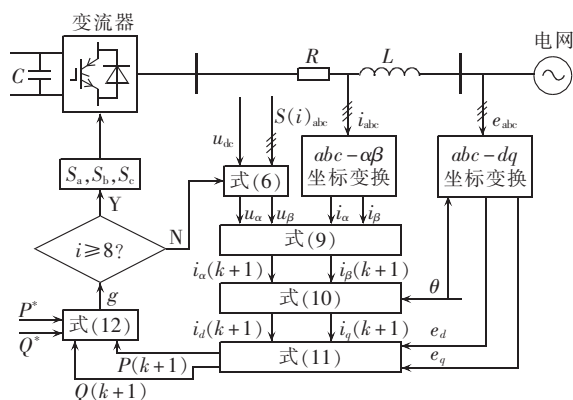


图 7 基于 P-DPC 的逆变侧变流器控制结构

Fig.7 Control structure of inverter-side converter based on P-DPC

$$\begin{cases} L \frac{di_{\alpha}}{dt} = e_{\alpha} - U_{\alpha} - Ri_{\alpha} \\ L \frac{di_{\beta}}{dt} = e_{\beta} - U_{\beta} - Ri_{\beta} \end{cases} \quad (13)$$

由于认为直流电压稳定, U_{α}, U_{β} 仍然可以由式(6)计算得到。离散化式(13)可以得到预测电流函数:

$$\begin{cases} i_{\alpha}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_{\alpha}(k) + \frac{T_s}{L} (e_{\alpha}(k) - U_{\alpha}(k)) \\ i_{\beta}(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_{\beta}(k) + \frac{T_s}{L} (e_{\beta}(k) - U_{\beta}(k)) \end{cases} \quad (14)$$

再经过 d, q 旋转变换以及数学计算, 可以得到输入 VSC 的有功功率和无功功率, 体现形式仍然可以由式(11)表示。由于整流侧变流器必须承担调节功率的功能, 所以在控制器中需加入直流功率调节环节。对于价值函数的选取, 整个系统必须在功率平衡下才能可靠运行, 采用如下价值函数:

$$g = |Q^* - Q(k+1)| + |P_{dc} + P_i - P(k+1)| \quad (15)$$

其中, P_{dc} 为调节后的直流功率; P_i 为除整流侧变流器外其他变流站消耗的有功功率。各 P_i 的大小依赖于较快速的通信系统。整个过程仍然基于 P-DPC 的矢量控制, 控制框图如图 8 所示。

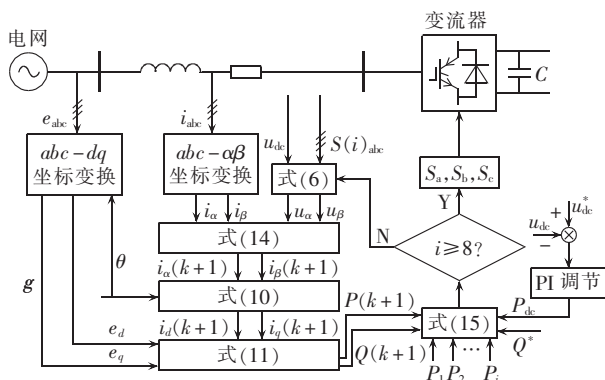


图 8 基于 P-DPC 的整流侧变流器控制结构

Fig.8 Control structure of rectifier-side converter based on P-DPC

3 协调控制器设计

在多端系统中若仅仅指定一个变流器采用定直流电压控制, 会导致系统运行可靠性差和有功功率不能准确控制^[19], 因此需要对一些变流器采用模式切换控制, 当主变流器无法满足功率调节时候, 具有功率调节功能的变流器能够自动承担功率缺额。本文中建立三端直流输电系统, 其中 VSC1 为主变流器, 采用定直流电压控制; VSC2 引入 P-DPC 协调控制, 工作状态能够在功率模式与直流电压模式之间切换, 即具有功率调节能力; VSC3 工作在功率模式, 不可切换。

基于 P-DPC 协调控制原理如下。

(1) 正常工作状态, 各个变流器的预测功率通过通信系统传输到主变流器, 利用式(6)与价值函数式(15), 给出正常工作状态下主变流器的控制门极信号, 实现 P-DPC, 保证各个变流器直接功率平衡; 此时 VSC1 工作在定直流电压模式, VSC2、VSC3 工作在功率模式。通常情况, 系统工作在这个状态, 工作状态如图 9(a)所示。

(2) VSC3 功率突变, VSC1 的输出功率超出其自由调节的允许范围 $[P_{\min}, P_{\max}]$, 超出功率部分将由直流系统内所有具有功率调节能力的 VSC2 来承担。此时, VSC1 保持最大功率或最小功率输出, 工作在定直流电压控制模式。基于 P-DPC 协调控制, VSC2

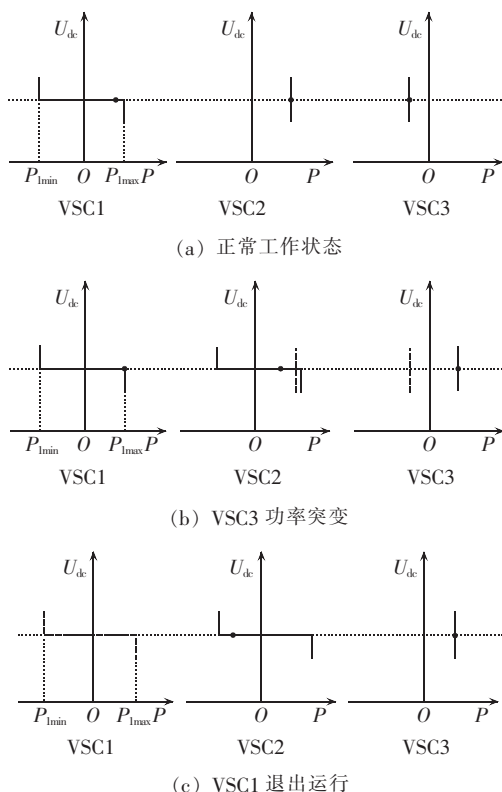


图 9 各状态下的 VSC 变流站的工作运行点

Fig.9 Operating point of VSC station for different statuses

由功率模式切换到直流电压模式,自动承担功率缺额,使整个系统重新保持功率平衡,VSC3 仍然工作在功率模式。工作状态如图 9(b)所示。

(3)主变流器 VSC1 退出运行,VSC2 完全承担功率缺额,VSC2 由功率模式切换到直流电压模式,VSC3 仍然工作在功率模式。此时相当于普通 VSC-HVDC 两端系统。工作状态如图 9(c)所示。

图 10 所示为基于 P-DPC 的协调功率控制器。当工作在正常状态时, $P_{\min}<P_1(k+1)<P_{\max}$,开关处于 1 状态,VSC2 工作在功率模式下;当 VSC1 功率调节不足或退出运行时, $P_1(k+1)$ 不在功率允许调节范围内,开关处于 2 状态,VSC2 工作在直流电压模式。

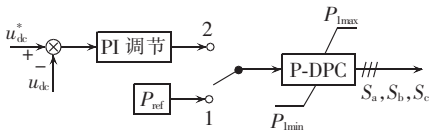


图 10 基于 P-DPC 的协调功率控制器
Fig.10 Power coordinating controller based on P-DPC

4 仿真结果与分析

本文用仿真软件 MATLAB/Simulink 对图 2 所示的系统进行数字仿真研究,验证模型和控制策略的有效性,仿真参数如下:VSC1、VSC2、VSC3 线电压为 380 V,直流电容为 4.7 mF,直流电压为 750 V,线路阻抗 $R=0.005\ \Omega$ 、 $L=5\ \text{mH}$,采样频率为 20 kHz。表 1 为变流器初始工作状态。讨论了系统在以下几种情况的响应过程,即:(1)正常工作状态,VSC3 侧有功功率突变,VSC1 输出功率在调节范围之内;(2)VSC3 侧有功功率突变,VSC1 输出功率超出调节范围;(3)VSC1 短时故障退出。

表 1 变流器初始工作状态
Table 1 Initial working statuses of VSC

变流器	初始功率	运行模式	调节范围
VSC1	3 kW	直流电压模式	$[-30\ \text{kW}, 30\ \text{kW}]$
VSC2	-9 kW	功率模式(可切换)	$[-30\ \text{kW}, 30\ \text{kW}]$
VSC3	6 kW	功率模式	不可调节

图 11 为情况(1)下的系统响应。从图 11 可以看出,当处于正常工作状态时,有功功率和直流电压都很稳定,其中,直流电压与预设值一样,保持在 750 V。在 0.1~0.2 s 时,VSC3 功率产生波动,由 6 kW 变化到-6 kW 时,主变流器 VSC1 自动调节功率平衡,系统运行稳定,说明基于 P-DPC 的控制策略是有效的。此情况下,VSC1 工作在定直流电压模式,VSC2 和 VSC3 工作在功率模式。

图 12 为情况(2)下的系统响应。由图 12 可以看出,在 0.1~0.2 s 时,VSC3 的有功功率突变,由原来

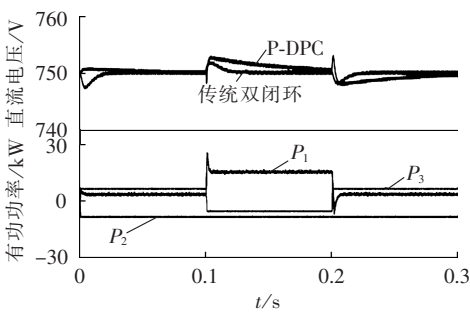


图 11 情形(1)的系统响应
Fig.11 System response in Condition 1

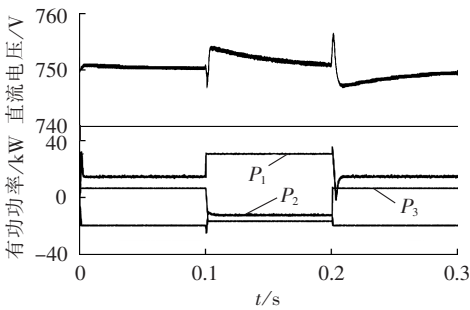


图 12 情形(2)的系统响应
Fig.12 System response in Condition 2

的 6 kW 变化到-15 kW,引起了直流系统功率不平衡,注入直流网络的功率小于其输出功率,直流电压下降,系统工作点发生变化。为检验控制器的有效性,设置 VSC2 初始功率为-20 kW,此时功率输出已超出主变流器 VSC1 的调节范围 $[-30\ \text{kW}, 30\ \text{kW}]$ 。VSC1 保持最大功率 30 kW 输出,VSC2 工作模式由功率模式自动切换到直流电压模式,调节系统功率平衡。

图 13 给出了情况(3)下的系统响应。0.1~0.2 s,VSC1 的短时退出运行造成了直流系统功率不平衡,直流电压发生波动,VSC2 由功率模式切换至直流电压模式,调节系统功率平衡,稳定直流电压。0.2 s 之后,断路器重合闸,系统在 0.05 s 内恢复正常运行。

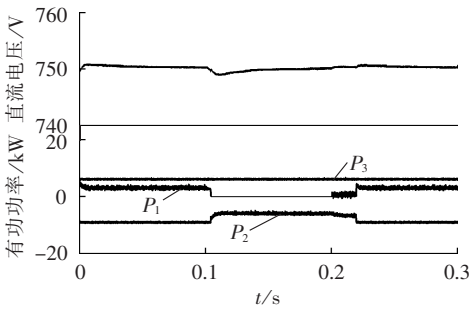


图 13 情形(3)的系统响应
Fig.13 System response in Condition 3

5 结论

本文利用变流器有限控制集模型预测控制,将预测功率应用到变流器控制中,设计了基于 P-DPC

的变流器本地控制器和协调控制器。该控制方法保留了预测控制的众多优点,有效避免了传统双闭环控制的 PI 参数整定和计算,无需线性控制器和脉宽调制,对变流器整流和逆变的控制复杂性大幅降低。同时,基于 P-DPC 的控制策略充分利用了离散化数学模型,计算简单,容易数字化实现。

MATLAB/Simulink 仿真表明所提出的控制策略并不复杂,而且相对传统控制策略更加容易实现,控制效果好,为 MTDC 控制提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] WANG Zhixin,JIANG Chuanwen,AI Qian,et al. The key technology of offshore wind farm and its new development in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2009,13(1):216-222.
- [2] WU Jie,WANG Zhixin,XU Lie,et al. Key technologies of VSC-HVDC and its application on offshore wind farm in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,36(8):247-255.
- [3] 张文亮,汤涌,曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术,2010,34(9):1-6.
ZHANG Wenliang,TANG Yong,ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology,2010,34(9):1-6.
- [4] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu,LUO Xiang,WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(10):8-17.
- [5] 袁旭峰,文劲宇,程时杰. 多端直流输电系统中的直流功率调制技术[J]. 电网技术,2007,31(14):57-61.
YUAN Xufeng,WEN Jinyu,CHENG Shijie. DC power modulation in multi-terminal HVDC transmission system[J]. Power System Technology,2007,31(14):57-61.
- [6] 王伟,石新春,付超. 海上 VSC-MTDC 输电系统协调控制策略[J]. 华北电力大学学报,2013(5):42-47.
WANG Wei,SHI Xinchun,FU Chao. Coordinated control of MTDC transmission system for offshore wind farms[J]. Journal of North China Electric Power University,2013(5):42-47.
- [7] 陈海荣,徐政. 适用于 VSC-MTDC 系统的直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(19):28-33.
CHEN Hairong,XU Zheng. Suitable for VSC-MTDC system DC voltage control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(19):28-33.
- [8] 陈海荣. 基于 VSC 的多端直流输电系统的控制策略研究[J]. 电力建设,2011(8):58-63.
CHEN Hairong. Control strategy of VSC based multi-terminal HVDC transmission system[J]. Electric Power Construction,2011 (8):58-63.
- [9] 王国强,王志新,张华强,等. 基于 DPC 的海上风场 VSC-HVDC 变流器控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):115-119.
WANG Guoqiang,WANG Zhixin,ZHANG Huaqiang,et al. DPC-based control strategy of VSC-HVDC converter for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7): 115-119.
- [10] 张明兴. 基于 VSC 的多端直流输电系统的运行控制研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [11] 付媛,王毅,张祥宇,等. 多端电压源型直流系统的功率协调控制技术[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):130-136.
FU Yuan,WANG Yi,ZHANG Xiangyu,et al. Coordinated power control of VSC-MTDC system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):130-136.
- [12] CHAUDHURI N R,MAJUMDER R,CHAUDHURI B,et al. Stability analysis of VSC MTDC grids connected to multimachine AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4): 2774-2784.
- [13] 孙文博. 多端柔性直流输电系统及控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
SUN Wenbo. Research on control strategy of VSC-MTDC[D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.
- [14] 陈谦,唐国庆,潘诗锋. 采用多点直流电压控制方式的 VSC 多端直流输电系统[J]. 电力自动化设备,2004,24(5):10-15.
CHEN Qian,TANG Guoqing,PAN Shifeng. VSC-MTDC using multi-terminal DC voltage control scheme [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(5):10-15.
- [15] RODRIGUEZ J,PONTT J,CORREA P,et al. Predictive power control of an AC/DC/AC converter [C]//Industry Applications Conference,2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. New Orleans, USA:IEEE,2005:934-939.
- [16] 陈强,任浩瀚,杨志超,等. 三相并网逆变器改进型直接功率预测控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):100-105.
CHEN Qiang,REN Haohan,YANG Zhichao,et al. Improved predictive direct power control of three-phase grid-connected converter [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34 (12):100-105.
- [17] 杨勇,赵方平,阮毅,等. 三相并网逆变器模型电流预测控制技术[J]. 电工技术学报,2011,26(6):153-159.
YANG Yong,ZHAO Fangping,RUAN Yi,et al. Model current predictive control for three-phase grid-connected inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(6): 153-159.
- [18] 沈坤,章兢,王坚. 一种多步预测的变流器有限控制集模型预测控制算法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(33):37-44.
SHEN Kun,ZHANG Jing,WANG Jian. A model predictive control scheme of multi-step prediction finite control set for converters[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(33):37-44.

作者简介:



江斌开

江斌开(1990—),男,福建龙岩人,博士研究生,主要研究方向为海上风力发电以及高压直流输电的变流器控制等(E-mail: 1990jiangbinkai@163.com);

王志新(1964—),男,贵州遵义人,教授,博士研究生导师,研究方向为海上风力发电、光伏发电、电机系统节能等;

陆斌锋(1980—),男,浙江嘉兴人,博士后,研究方向为分布式发电技术;

史莉(1978—),女,甘肃兰州人,工程师,从事电力系统及其自动化研发工作。

(下转第 24 页 continued on page 24)

- [24] 胡永银,李兴源,周洪宇,等. 应用于 VSC-HVDC 输电的谐波抑制控制器[J]. 电网技术,2014,38(3):583-588.
HU Yongyin,LI Xingyuan,ZHOU Hongyu,et al. A kind of harmonic suppression controller used in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology,2014,38(3):583-588.
- [25] 刘德贵,费景高. 动力学系统数字仿真算法[M]. 北京:科学出版社,2000:259-264.
- [26] BRANDT R M,ANNAKAGE U D,BRANDT D P,et al. Validation of a two-time step HVDC transient stability simulation model including detailed HVDC controls and DC line L/R dynamics[C]//2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal,Canada:IEEE,2006:1-6.

作者简介:



张 芳

张 芳(1972—),女,内蒙古呼和浩特人,副研究员,博士,研究方向为高压直流输电研究、灵活交流输电系统控制方法(E-mail:zhangfang@tju.edu.cn);

李静远(1990—),男,河南鹤壁人,硕士研究生,研究方向为基于电压源变流器高压直流输电系统控制方法(E-mail:lijingyuan@tju.edu.cn);

李传栋(1979—),男,福建安溪人,高级工程师,博士,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定分析及规划。

Electromechanical transient simulation of AC-DC hybrid systems containing VSC-HVDC

ZHANG Fang¹,LI Jingyuan¹,LI Chuandong²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

2. Electric Power Research Institute of Fujian Provincial Power Co.,Ltd.,Fuzhou 350007,China)

Abstract: The electromechanical transient simulation is studied for the AC-DC hybrid system containing VSC-HVDC(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current). The outer-loop power/voltage controller of VSC-HVDC applies the PI(Proportional Integral) control to generate the inner-loop current reference. Since the AC-side mathematical model of VSC-HVDC on the dq synchronous rotating coordinates cannot be accurately decoupled,its mathematical model on the $\alpha\beta$ stationary coordinates is established and the PR(Proportional Resonant) control is introduced to the inner-loop current controller to track the inner-loop current signal with zero steady-error,which realizes the decoupled precise control of VSC-HVDC. The dual time-step method is used to accurately simulate the dynamic response of VSC-HVDC. The correctness of the VSC-HVDC electromechanical transient model and the validity of the proposed dual time-step hybrid simulation method are verified by the simulative results of New England system.

Key words: VSC-HVDC; HVDC power transmission; electromechanical transient; proportional resonant control; dual time-step hybrid simulation; AC-DC hybrid system

(上接第16页 continued from page 16)

MTDC converter control based on P-DPC

JIANG Binkai¹,WANG Zhixin¹,LU Binfeng²,SHI Li³

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240,China;2. Jiaying Renewable Power Electrical Co.,Ltd.,Jiaying 314031,China;

3. Shanghai Najie Electrical Plants Co.,Ltd.,Shanghai 201111,China)

Abstract: A simulation model of three-terminal parallel VSC-MTDC (Voltage-Source Converter based Multi-Terminal HVDC transmission) is built on MATLAB/Simulink platform,and the local controller and coordinating controller are respectively designed based on P-DPC(Predictive-Direct Power Control). When one converter station is disturbed or out of operation,the main converter station then provides the compensating power;when the main converter station reaches the upper limit of power output,a converter station with power regulation function will change its operating mode to automatically assume the power vacancy for ensuring the stable system operation. The operation of each converter station is relatively independent to improve the system stability. The simulative results show that the designed controller is simple and its control effect is better than that of traditional dual closed-loop control strategy.

Key words: VSC-MTDC; P-DPC; local control; coordinated control; MATLAB; stability; HVDC power transmission; control