

多端柔性直流输电中换流站的同步切换控制策略

付强, 杜文娟, 王海风, 郑凯元

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Synchronous Switching Control Strategy for VSC Station in MTDC Network

FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng, ZHENG Kaiyuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Power synchronization control and vector control are two optional control strategies for VSC station in MTDC network. Power synchronization control is more suitable to connect a weak ac system, showing similar dynamic characteristics to generator and possibly positive for angle and frequency stability of AC systems, compared with vector control. But for DC side fault, VSC station utilizing power synchronization control will appear huge DC voltage fluctuation. In order to match the most suitable control method under different operation modes of power system, a synchronous switching control strategy is proposed in this paper. This control strategy makes two control strategies coexist in one VSC station, realizing switching to vector control from power synchronization control to reduce DC voltage fluctuation under DC fault. Simulation results of three-terminal AC/DC transmission systems in PSCAD show that this control strategy can achieve undisturbed switching and improve stability of AC/DC transmission system under different faults.

KEY WORDS: VSC-MTDC; vector control; power synchronization control; synchronous switching control strategy

摘要: 功率同步控制和矢量控制均是多端柔性直流输电系统(multi-terminal voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-MTDC)中换流站的可选控制方式。与更加常用的矢量控制方式相比,功率同步控制方式的原理与同步发电机类似,进而显现了相近的控制特性,更适用于与交流电网的弱连接,有利于交流电网的功角和频率稳定性,但其缺点是在直流侧故障下,换流站会出现较大的直流电压波动,恶化系统的动态特性。为了使换流站能够在不同的电网运行工况下匹配最合适的控制方式,提出一种可切换的控制策略,实现了在同一换流站中功率同步和矢量控制方式并存,并可依据需求实现无扰动自动切换。最后以

PSCAD 中搭建的三端交直流系统为例,演示和验证了同步切换控制策略的可行性。

关键词: VSC-MTDC; 矢量控制方式; 功率同步控制方式; 同步切换控制策略

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1645

0 引言

随着多端柔性直流输电(multiterminal voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-MTDC)技术的发展,矢量控制^[1]成为了电压源换流站中最受关注的控制方式,在实际中得到了广泛的应用^[2-5]。但是相关研究发现:当换流站与交流电网弱连接时,矢量控制中锁相环的动态特性会恶化系统的稳定性^[6-7]。针对这一问题,文献[8]提出了功率同步控制方式,实现了换流站与交流系统的同步运行;文献[9]引入了电流环控制,有效限制了短路电流。功率同步控制的提出不仅规避了锁相环的使用,也为交流电网提供了惯性支撑。

目前关于功率同步控制的研究仍集中在理论阶段,文献[10]对采用功率同步控制方式的换流站进行了稳定极限分析,结果表明在该控制方式下采用电压控制模式相比无功控制模式具有更大的稳定极限。文献[11]将功率同步控制方式应用到了双馈风机的换流站中,通过对一个两端交直流网络进行时域仿真,验证了功率同步控制方式的可行性,并给出了在风电厂侧和交流电网侧发生故障时对应的解决方案。文献[12]则对功率同步控制方式和矢量控制方式进行了对比分析,认为采用功率同步控制方式可提升次同步振荡的阻尼,并且可以稳定地实现与电网的弱连接。

电网的运行工况具有复杂性,单一的控制策略越来越难以满足上述需求^[13-16]。文献[13]指出,随着大量分布式电源的接入,快速响应的电力电子装

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGZJ0000BGJS1500265)。

Project Supported by State Grid Science & Technology Project

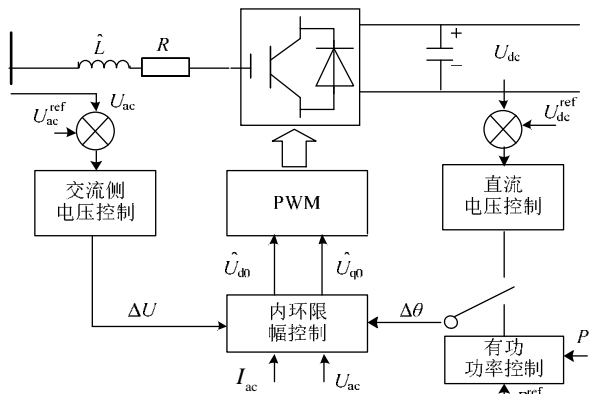


图3 功率同步控制原理图

Fig. 3 Principle diagram of power synchronization control
 可以进行简单的等效处理。和矢量控制方式不同，功率同步控制方式并没有实现解耦控制，其同步控制特性与发电机类似，所以采用功率同步控制方式的换流站将会与交流侧有更明显的耦合。

当不考虑功率同步内环时，即认为电流没有超限，图4中绿色区域是无功控制外环，紫色区域是有功率控制外环， U_0 和 θ_0 为定值。 U_0 为换流站侧设定的交流电压幅值； θ_0 为换流站侧交流电压的初始角度； ω_p^{ref} 为功率同步控制方式中所使用的角频率；控制器参数中， $K_{p,p}^s$ 、 $K_{i,p}^s$ 分别为有功环比例和积分常数； $K_{p,q}^s$ 、 $K_{i,q}^s$ 分别为无功环比例和积分常数。

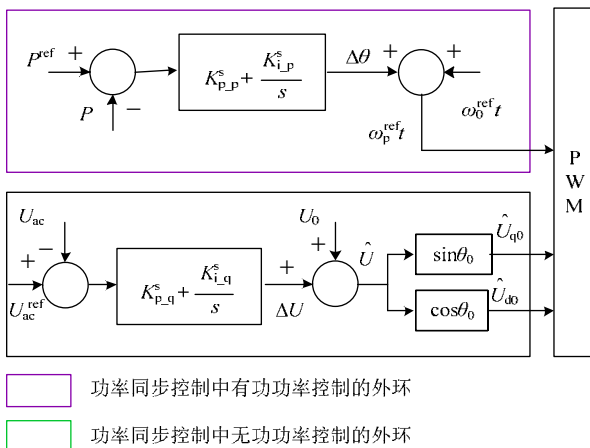


图4 功率同步控制的控制过程

Fig. 4 Control process of power synchronization control

对于同一系统，图2中矢量控制的输出信号 $\omega_v^{\text{ref}} t$ 、 U_{cd} 、 U_{cq} 和图4中功率同步控制的输出信号 $\omega_p^{\text{ref}} t$ 、 \hat{U}_{d0} 、 \hat{U}_{q0} 在稳态时有如图5所示的关系成立。即在 ω_p^{ref} 角频率下对应的输出信号 \hat{U}_{d0} 和 \hat{U}_{q0} 若转换到 ω_v^{ref} 角频率下则为 U_{cd} 和 U_{cq} ，这样的转化关系有利于2种控制方式之间的切换。考虑到图5是实现2种控制策略切换的关键环节之一，所以基于图6

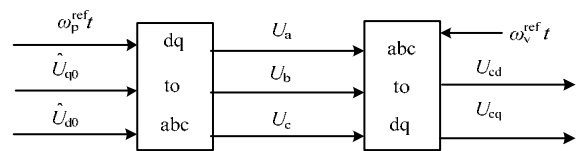


图5 功率同步控制和矢量控制输出信号之间的联系
 Fig. 5 The relationship between the output signals of power synchronization control and the vector control

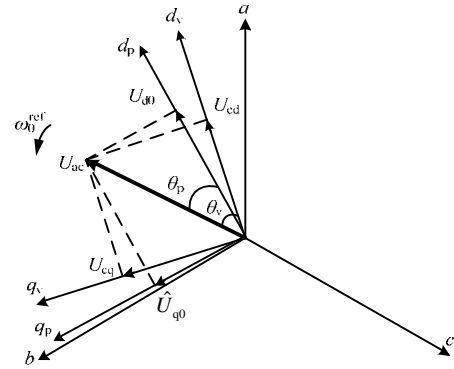


图6 功率同步控制和矢量控制的 d-q 轴坐标系及其分量
 Fig. 6 The d-q axis coordinate and its components of power synchronization control and vector control

进一步分析2个旋转角度对切换控制效果的影响。

图6中abc是静止同步坐标系， d_p, q_p 是功率同步控制下的 d-q 轴坐标系， d_v, q_v 是矢量控制下的 d-q 轴坐标系， θ_p 和 θ_v 分别是 d_p 轴和 d_v 轴与 U_{ac} 之间的角度。在稳态情况下有：

$$\begin{cases} U_{cd} = \frac{\hat{U}_{d0}}{\cos(\theta_p)} \cos(\theta_v) \\ U_{cq} = \frac{\hat{U}_{d0}}{\cos(\theta_p)} \sin(\theta_v) \end{cases} \quad (1)$$

当系统受到扰动时，功率同步控制和矢量控制的控制器输出角度将会与真实角度产生一定的偏差，令为 $\Delta\theta_p + \theta_p$ 和 $\Delta\theta_v + \theta_v$ ，则此时由于角度偏差引起的切换扰动可计算如下：

$$\begin{cases} \Delta U_{cd} = \frac{\hat{U}_{d0} \cos(\Delta\theta_v + \theta_v)}{\cos(\Delta\theta_p + \theta_p)} - \frac{\hat{U}_{d0} \cos \theta_v}{\cos \theta_p} = \\ \hat{U}_{d0} \left(\frac{\cos \Delta\theta_v \cos \theta_v - \sin \Delta\theta_v \sin \theta_v}{\cos \Delta\theta_p \cos \theta_p - \sin \Delta\theta_p \sin \theta_p} - \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_p} \right) \approx \\ \frac{\hat{U}_{d0} \cos \theta_v}{\cos \theta_p} \left(\frac{\cos \Delta\theta_v - 1}{\cos \Delta\theta_p} \right) \\ \Delta U_{cq} = \frac{\hat{U}_{d0} \sin(\Delta\theta_v + \theta_v)}{\cos(\Delta\theta_p + \theta_p)} - \frac{\hat{U}_{d0} \sin \theta_v}{\cos \theta_p} = \\ \hat{U}_{d0} \left(\frac{\sin \Delta\theta_v \cos \theta_v + \cos \Delta\theta_v \sin \theta_v}{\cos \Delta\theta_p \cos \theta_p - \sin \Delta\theta_p \sin \theta_p} - \frac{\sin \theta_v}{\cos \theta_p} \right) \approx \\ \frac{\hat{U}_{d0} \sin \theta_v}{\cos \theta_p} \left(\frac{\cos \Delta\theta_v - 1}{\cos \Delta\theta_p} \right) \end{cases} \quad (2)$$

可见, 切换造成的系统扰动 ΔU_{cq} 和 ΔU_{cd} 取决于偏差量 $\Delta\theta_v$ 和 $\Delta\theta_p$ 的相对方向, 如果二者同向等值, 则扰动最小, 反之扰动增加, 不利于系统的稳定运行。所以, 当系统处于稳态时, 切换控制不会对系统产生额外的影响; 当系统发生故障后, 切换指令发出的时间越快, 偏差量 $\Delta\theta_v$ 和 $\Delta\theta_p$ 越小, 系统受到的额外扰动将越小, 切换效果越好。

1.3 VSC-MTDC 系统

本文基于图 7 所示的三端直流网络进行研究, 其中直流网采用单极传输, 换流站之间采用主从控制方式^[19]。每个换流站内部均可以同时存在功率同步控制和矢量控制 2 种可选控制方式。系统的具体

参数见附录表 1。其中, 换流站 2 使用定直流电压和交流电压控制, 换流站 1 和换流站 3 使用定有功功率和定交流侧电压控制。从图 7 可以看出三端直流网络连接着 2 个独立的交流网, 其中左侧交流网由 2 个发电机组成, 用于研究系统的暂态稳定性, P_{s1} 、 P_{s2} 和 P_{s3} 分别为换流站 1、2 和 3 的输出功率。

对于一个运行环境可能会发生变化的电网, 固定的运行方式并不能始终为电网的稳定性带来积极的影响, 甚至在特定的环境下对电网运行带来不利的影响, 因此本文提出了一种适用于直流换流站的同步切换控制策略, 提升电网在不同运行工况下的稳定性。

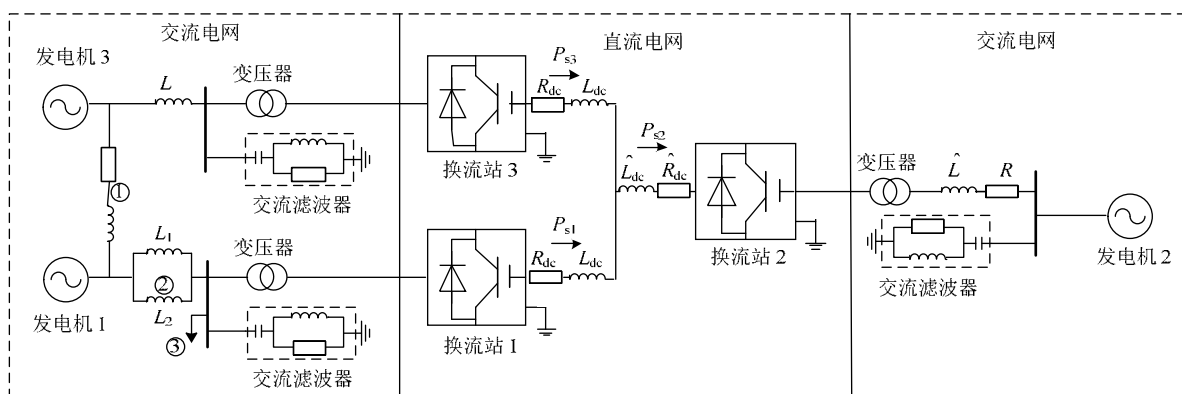


图 7 多端交直流混合系统结构

Fig. 7 The structure of multiterminal AC/DC systems

2 同步切换控制策略

同步切换控制策略是指在同一换流站中同时存在多种可选控制方式, 在某一时刻仅有一种控制方式处于运行状态并成为 PWM 模块唯一的输入, 其余控制方式处于初始化状态, 不参与控制。当切换指令发出后, 可以无扰动地切换到另外一种控制方式。本文主要研究的是矢量控制和功率同步控制 2 种控制方式之间的同步切换控制策略。

2.1 同步切换控制策略的必要性

虽然 2 种控制方式均可以实现限流, 但是功率同步控制在惯性支撑和实现电网弱连接方面更具有优势, 此外两者与交流侧的动态交互性能是不一样的, 采用矢量控制的换流站与交流侧的动态交互较弱, 更多地体现了交直流隔离能力。采用功率同步控制的换流站与交流侧的动态交互较强, 在一定条件下可以提升交流侧机电振荡模式的阻尼, 改善其功角稳定性。切换的目的是为了实现在电网运行工况变化后, 换流站能够使用最合适的控制方式来提升系统的稳定性, 同步的目的是为了减小切换对系统运行产生的干扰, 这一过程一般来说只有几毫

秒, 所以几乎不会对系统产生不利影响。

切换是根据电网的需求来进行的, 如果需要与弱连接的电网相连, 或者需要交直流之间有较强的动态交互, 则应该切换为功率同步控制方式。如果需要进行交直流更好的隔离能力, 则应切换为矢量控制方式。考虑到二者的不同动态特性, 在以下几个场合应该考虑使用同步切换控制策略进行切换。

1) 用于与弱连接的电网相连。

当交流线路由于发生断路或其他故障导致交流网与换流站之间呈现弱连接时应切换为功率同步控制方式。文献[6-7]指出, 矢量控制方式中的锁相环会对换流站的稳定性产生不利影响, 功率同步控制方式则通过不使用锁相环避免了其带来的问题。

2) 降低直流线路故障时直流电压的波动。

功率同步控制方式相比于矢量控制方式, 其交直流耦合能力更强, 当发生直流故障时, 较强的交直流耦合能力会导致直流网电压的大幅波动, 不利于直流电网的稳定。所以当直流线路发生故障时, 应考虑使用同步切换策略将功率同步控制方式切换为矢量控制方式。

2.2 同步切换控制策略的流程

图8所示为同步切换控制策略的流程图。综合前文的论述,功率同步控制能够与不同强度的电网相连,所以系统的初始运行方式选择为功率同步控制方式,不必对系统的初始工况进行检测。当系统正常运行后,将对系统的运行状态进行检测,交流系统的常用故障检测算法有傅里叶算法和卡尔曼滤波算法,此外文献[20]还提出了快速性和准确性更高的基于小波信号奇异性检测的电力系统故障检测算法。对于直流系统的故障检测,主要理论有分形理论和小波变换理论,文献[21]提出了基于小波时间熵的直流线路单极接地故障检测方法,文献[22]分析了直流的断线故障特性。在电网连接强度检测方面,文献[23]提出了双谐波注入的弱电网阻抗在线检测方法,实现了对弱连接电网的精准快速检测。

若发生了直流侧故障且与电网的连接不是弱连接,则换流站的控制方式将从功率同步控制切换为矢量控制方式以减少直流侧波动对交流电网的影响;若发生了交流侧故障,则换流站的控制方式将从矢量控制切换为功率同步控制方式;若同时发生交流故障与直流故障,则以交流故障为优先。为了避免系统连续发出切换指令,系统设置了切换结束的判定条件,只有在一次切换控制结束后,系统才会再次进入故障监测状态并发出相关指令。对于直流侧故障上述切换过程,切换结束的判定条件是:直流侧电压波动量($U_{dc}^{ref} - U_{dc}$)小于切换值 α_{dc} 。对于交流侧故障,切换结束的判定条件为:交流侧功率波动量($P^{ref} - P$)小于切换值 α_{ac} 。

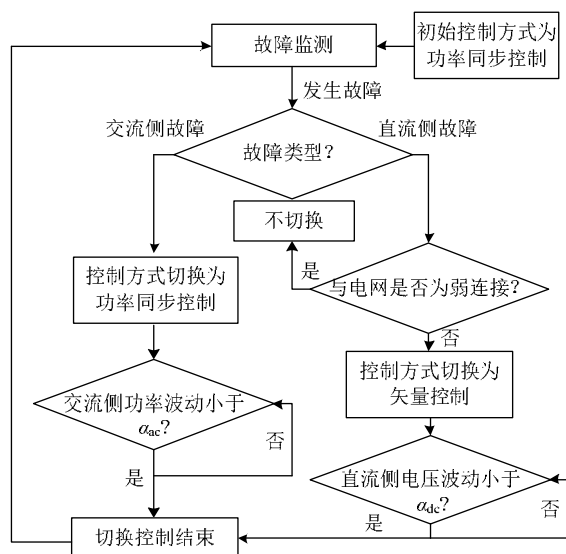


图8 同步切换控制策略的流程框图

Fig. 8 Flowchart of synchronous switching control strategy

2.3 同步切换控制策略的实现

2.3.1 功率同步控制方式切换到矢量控制方式

如图9所示,稳态时换流站处于功率同步控制方式, \hat{U}_{d0} 和 \hat{U}_{q0} 是 ω_p^{ref} 频率下换流站输出的控制参数。与此同时,矢量控制方式利用外部参数进行初始化, $I_d, I_q, U_{d0}, U_{q0}, \omega_v^{ref} t$ 来自于系统测量, U_{cd} 和 U_{cq} 由功率同步控制方式的输出经过图5的变换得到。

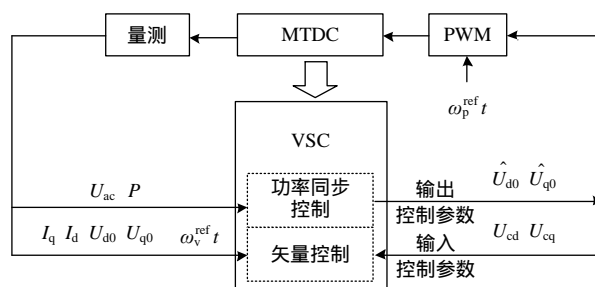


图9 功率同步控制切换到矢量控制方式原理图

Fig. 9 Principle diagram of switching control from power synchronization control to vector control

矢量控制的详细初始化流程如图10所示,共有4个PI控制器被初始化,红色箭头表示PI控制器的有效输入(参与初始化),黑色表示无效输入(不参与初始化)。

根据图10,换流站处于功率同步控制方式控制

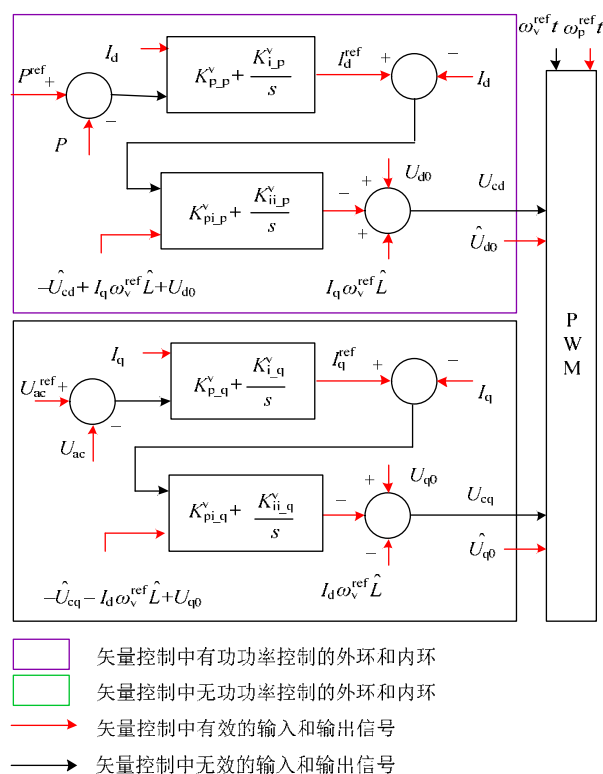


图10 换流站处于功率同步控制方式控制时,矢量控制方式的初始化流程

Fig. 10 Initialization process of vector control when power synchronization control is active

时，在矢量控制方式的初始化流程中始终有：

$$\begin{cases} I_q^{\text{ref}} = I_q \\ I_d^{\text{ref}} = I_d \\ U_{cq} = U_{cq} + I_d \omega_v^{\text{ref}} \hat{L} - U_{q0} + U_{q0} - I_d \omega_v^{\text{ref}} \hat{L} = U_{cq} \\ U_{cd} = U_{cd} + I_q \omega_v^{\text{ref}} \hat{L} - U_{d0} + U_{d0} - I_q \omega_v^{\text{ref}} \hat{L} = U_{cd} \end{cases} \quad (3)$$

其中 I_d, I_q 是控制器的输入值，来源于系统的量测，并将上述输入值作为后续控制的参考值 $I_d^{\text{ref}}, I_q^{\text{ref}}$ ，其余控制器的原理与此类似。

从功率同步控制方式切换到矢量控制方式的瞬间，即从图 10 变为图 2，有：

$$\begin{cases} I_q^{\text{ref}} - I_q = 0 \\ I_d^{\text{ref}} - I_d = 0 \\ P^{\text{ref}} - P = 0 \\ U_{ac}^{\text{ref}} - U_{ac} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

切换瞬间造成的扰动为 0，进而实现了从功率同步控制方式向矢量控制方式的无扰动切换。

2.3.2 矢量控制方式切换到功率同步控制方式

如图 11 所示，稳态时换流站处于矢量控制方式， U_{cd} 和 U_{cq} 是换流站的输出控制信号。与此同时，功率同步控制方式利用外部参数进行初始化， $I_d, I_q, U_{d0}, U_{q0}, U_{ac}, P$ 来自于系统测量， \hat{U}_{d0} 和 \hat{U}_{q0} 由功率同步控制方式的输出经过图 5 的变换得到，其中 $\omega_p^{\text{ref}} = \omega_v^{\text{ref}} + \Delta\theta$ 。

上述初始化的关键是能够获得 $\Delta\theta$ 的初始值。为此，需要通过已知的 U_{cd} 和 U_{cq} 进行求解，从图 5 中可得

$$\begin{cases} U_{cd} = \hat{U}_{d0} \cos \Delta\theta + \hat{U}_{q0} \sin \Delta\theta \\ U_{cq} = \hat{U}_{q0} \cos \Delta\theta + \hat{U}_{d0} \sin \Delta\theta \end{cases} \quad (5)$$

显然仅仅已知 U_{cd} 和 U_{cq} 的初值无法求得 $\Delta\theta$ 、 \hat{U}_{d0} 和 \hat{U}_{q0} 的初始值，无法对其进行初始化。为此增加一个积分环节，对功率同步控制方式进行改进设计，如图 12 所示。

容易验证改进后的控制方式在稳态时 $\Delta\theta = 0$ ，式(5)可变为：

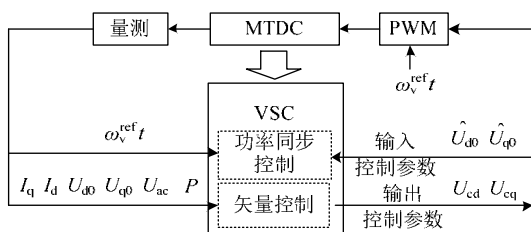


图 11 矢量控制切换到功率同步控制方式原理图

Fig. 11 Principle diagram of switching control from vector control to power synchronization control

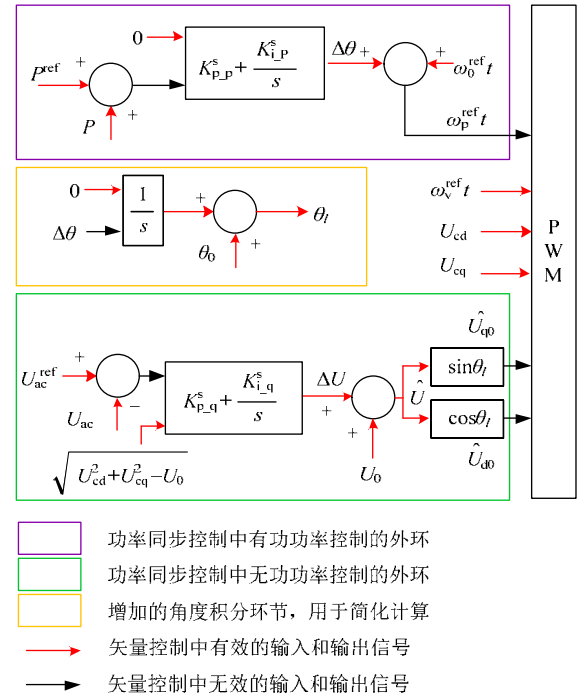


图 12 换流站处于矢量控制方式控制时，功率同步控制方式的初始化流程

Fig. 12 Initialization process of power synchronization control when vector control is active

$$\begin{cases} \omega_v^{\text{ref}} = \omega_p^{\text{ref}} \\ \hat{U}_{q0} = U_{cq} \\ \hat{U}_{d0} = U_{cd} \\ \theta_0 = \theta_i = \arccos \frac{U_{cq}}{U_{cd}} \\ \Delta U = \sqrt{U_{cq}^2 + U_{cd}^2} - U_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

U_0 为设定值，一般取为 1。内部控制器的初始化流程如图 12 所示，共有 3 个 PI 控制器被初始化，红色箭头表示 PI 控制器的有效输入(参与初始化)，黑色表示无效输入(不参与初始化)。

从矢量控制方式切换到功率同步控制方式的瞬间，即从图 12 变为图 4，有：

$$\begin{cases} P^{\text{ref}} - P = 0 \\ U_{ac}^{\text{ref}} - U_{ac} = 0 \\ \omega_v^{\text{ref}} - \omega_p^{\text{ref}} = \Delta\theta = 0 \end{cases} \quad (7)$$

切换瞬间造成的扰动为 0，从而实现了矢量控制方式向功率同步控制方式的无扰动切换。

3 同步切换控制策略在 VSC-MTDC 的仿真验证

以图 7 中的系统为研究对象，在 PSCAD 中搭建仿真模型，验证上述的分析结果。其中 $a_{ac}=0.1$ MW， $a_{dc}=1$ kV，故障检测算法的延迟时间参考文献[20]给出的数值，综合考虑切换控制自身的时间裕度，

默认为 $T=0.006\text{ s}$, 即切换指令将在故障开始后, 延时 $T\text{ s}$ 自动发出。

3.1 稳态切换

稳态切换是指在没有故障发生的情况下进行控制方式之间的切换, 验证在稳态时同步切换策略对系统的影响。为了能更准确地体现同步控制策略的性能, 选定对扰动最为敏感的定直流电压换流站(换流站 2)进行切换测试, 其余换流站选定为矢量控制方式, 如图 13 所示。换流站 2 的初始设定为功率同步控制方式, 1 s 时切换为矢量控制方式, 4 s 时切换为功率同步控制方式。可以发现, 不论从矢量控制切换为功率同步控制还是其逆过程, 切换造成的扰动都非常小。容易验证, 在定功率换流站进行控制方式之间的同步切换所造成的扰动将会更小。若多端系统同时进行控制方式的切换, 其对系统的扰动主要决定于定直流电压的换流站。

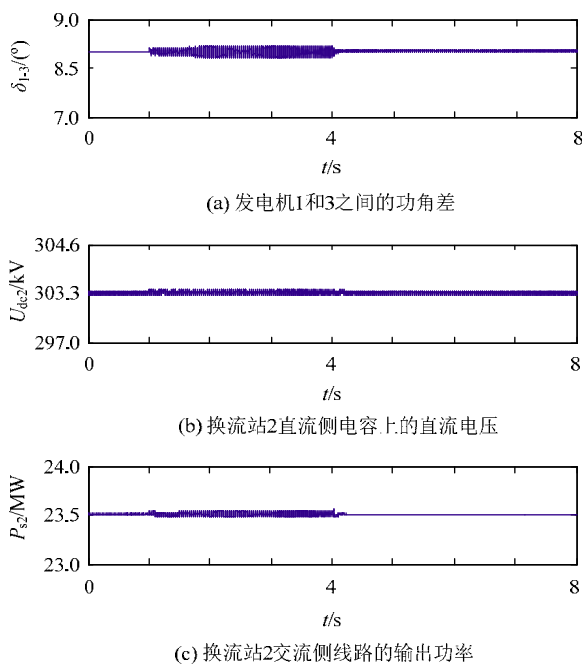


图 13 稳态切换仿真结果

Fig. 13 Simulation results of switching under steady state

3.2 直流侧故障

直流侧 $N-1$ 故障是指多端系统中, 某一个换流站由于故障退出运行的情况, 这种故障较为严重, 可以更好地评估同步切换策略在直流侧故障下的性能。切换测试选定于换流站 2, 其余换流站选择矢量控制方式, $N-1$ 故障发生于换流站 3。

系统于 1 s 发生换流站 3 直流侧断线故障, 随后换流站 3 退出运行, 不同控制方式下直流电压的波动曲线如图 14 所示。其中图 14(a)中曲线的峰谷值为 307 kV、270 kV。图 14(b)中曲线的峰谷值为 305 V、292 V。显然, 若换流站 2 采用功率同步控

制方式, VSC-MTDC 系统将面临较大的电压波动。对整体系统产生不利影响。为此, 可以将图 14(a)中的功率同步控制方式切换为矢量控制方式, 在故障发生时其结果为图 14(c)所示。切换后的控制性能和矢量控制几乎一样, VSC-MTDC 系统直流电压的波动得到了抑制。

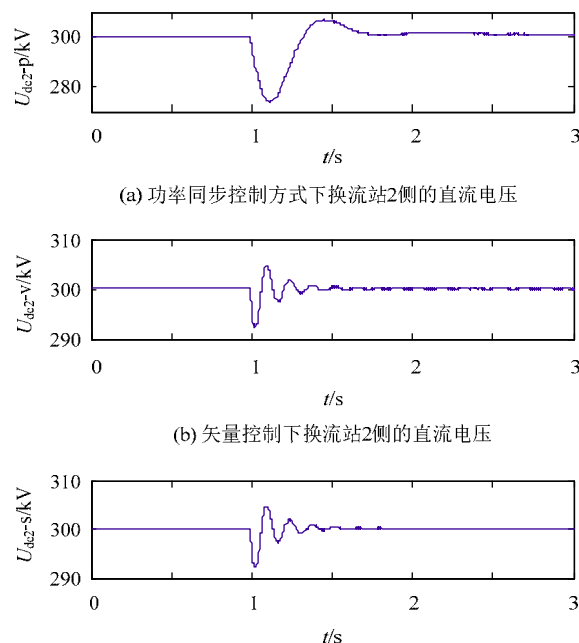


图 14 直流侧 $N-1$ 故障时仿真结果

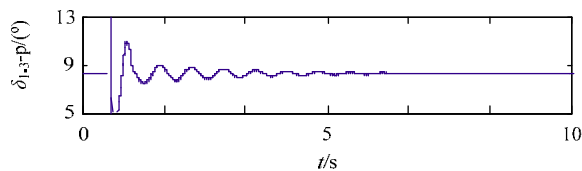
Fig. 14 Simulation results under DC side $N-1$ fault

3.3 交流侧短路故障

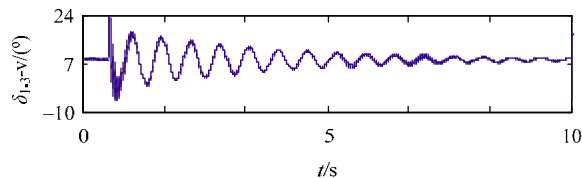
功率同步控制方式的原理与同步发电机类似, 可以为弱连接的电网提供电压支撑, 在一定条件下, 可以增加交流电网的惯性提升交流侧的功角稳定性。

系统于 1 s 在图 7 的位置 发生了交流侧三相短路故障, 持续 0.1 s。切换测试位于换流站 1, 其余换流站采用矢量控制方式。不同控制下发电机 1、3 之间的功角差波动曲线如图 15 所示。

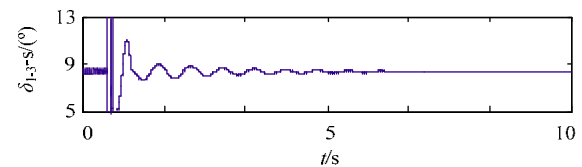
图 15(a)中曲线的机电振荡频率为 0.77 Hz, 阻尼比为 0.05。图 15(b)中曲线的机电振荡频率为 0.83 Hz, 阻尼比为 0.03。采用同步切换策略可以将换流站的控制方式切换为功率同步控制方式, 进而提升交流侧的功角稳定性, 图 15(c)中曲线的机电振荡阻尼一致。所以同步切换控制策略在一定条件下可以用于提升交流侧的功角稳定性。图 16 中对比了矢量控制和功率同步控制在交流短路故障下直流侧电压的波动情况, 可以发现, 虽然切换控制中直流电压在第一摆的振幅较大, 但是衰减速度较快, 没有对直流系统造成不利影响。



(a) 功率同步控制方式下发电机1和3之间的功角差



(b) 矢量控制方式下发电机1和3之间的功角差



(c) 矢量控制切换为功率同步控制方式后发电机1和3之间的功角差

图 15 不同控制方式在交流侧短路故障下的功角曲线
Fig. 15 Load angle with different controls under AC side short circuit fault

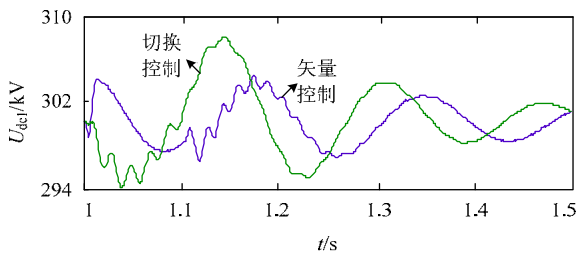


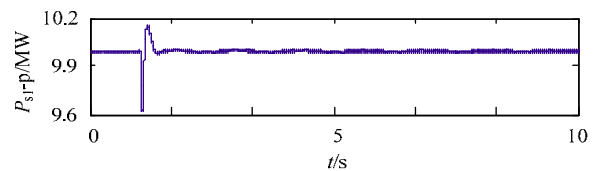
图 16 不同控制方式在交流侧短路故障下的直流电压曲线
Fig. 16 DC voltage with different controls under AC side short circuit fault

3.4 交流侧断路故障

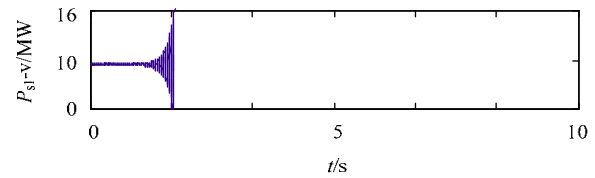
系统于 1 s 在图 7 的位置 发生了交流侧永久性断路故障。切换测试位于换流站 1, 其余换流站采用矢量控制方式。不同控制下换流站 1 输出的有功功率曲线如图 17 所示。

图 17(a)中, 线路故障并不会影响系统的稳定运行; 但是在图 17(b)中, 线路故障导致了换流站与电网之间呈现弱连接^[24], 采用矢量控制的换流站难以稳定运行。图 17(c)中, 由于采用了切换控制, 系统仍可以维持稳定运行。所以同步切换控制策略可以解决由于线路故障引起的电网连接变弱, 进而导致矢量控制失稳的稳定性问题。同理, 由图 18 中的直流电压波动曲线也可证明切换控制在与弱电网连接时的有效性。

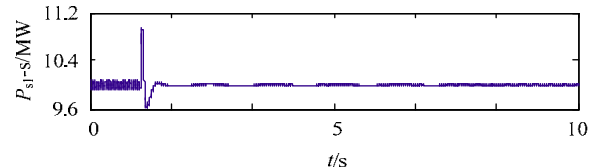
由以上仿真结果可知, 同步切换控制策略可以实现矢量控制方式和功率同步控制方式之间的无扰动切换, 并且能够提升电网在不同运行工况下的稳定性。



(a) 功率同步控制下换流站1输出的有功功率



(b) 矢量控制下换流站1输出的有功功率



(c) 矢量控制切换为功率同步控制后换流站1输出的有功功率

图 17 不同控制方式在交流侧断路故障下的功角曲线
Fig. 17 Load angle with different controls under AC side circuit breakage fault

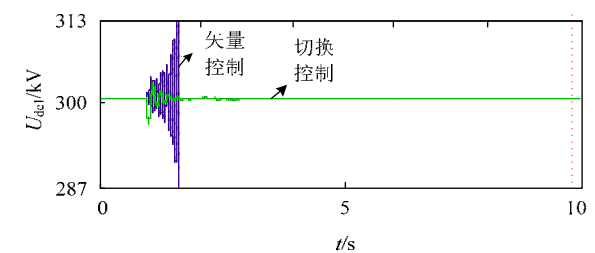


图 18 不同控制方式在交流侧断路故障下的直流电压曲线
Fig. 18 DC voltage with different controls under AC side circuit breakage fault

3.5 误切换的影响评估

依据图 9 中所示的控制流程, 非故障波动时是不会发生切换的, 其是否会误切换取决于目前故障检测技术的准确度^[21-23]。从系统影响来讲, 即使在非故障波动时发生了误切换, 误切换所产生的扰动是非常小的, 下面对其进行案例验证。系统于 0 s 在 处增加了 10% 的有功负荷, 并于 0.1 s 恢复正常, 假设切换控制于 0.006 s 发出误切换指令, 使得换流站 1 从功率同步控制切换为矢量控制, 系统的仿真结果如图 19 所示。

由图 19 可知, 由于误切换改变了换流站的控制方式, 进而改变了系统故障后的振荡特性, 但是切换本身不会对系统产生明显的额外扰动, 不会对系统稳定性产生恶劣影响。综上, 误切换在发生概率和影响风险 2 个方面均比较小, 验证了切换控制的可靠性。

3.6 旋转角度对切换控制效果的影响

为了验证 1.2 中旋转角度对切换控制效果的影

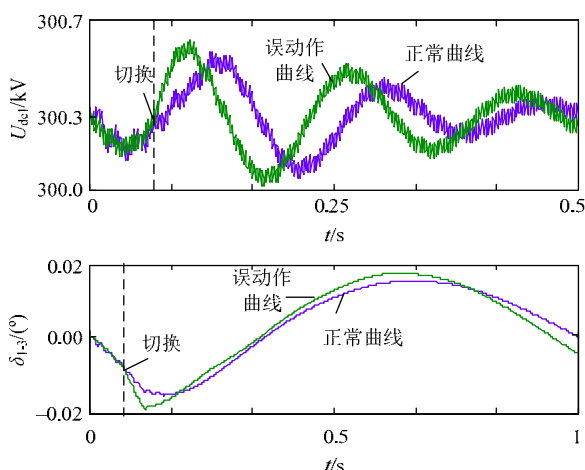


图19 误切换扰动对系统运行的影响

Fig. 19 The impact of error switching on system operation
 响分析结果,对故障后的切换指令设定了不同的延时,分别为 0.006 s、0.024 s 和 0.048 s,以 θ_p 为参照,则有 $\Delta\theta_p = 0$, $\Delta\theta_v$ 分别为 0.067 rad、0.149 rad 和 0.253 rad,其对系统稳定性的影响如图 20 所示。系统于 1 s 在图 7 的位置 发生了交流侧三相短路故障,持续 0.1 s 后恢复。换流站 1 由矢量控制切换为功率同步控制。可见,切换指令发出时,旋转角度偏差量越大,切换效果越差,对系统稳定性的影响越大,验证了理论的定性分析结果。

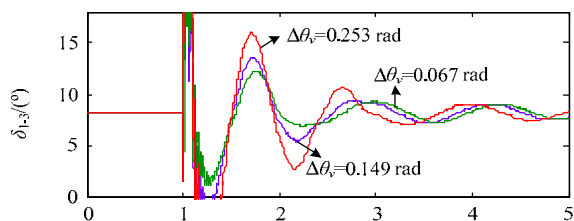


图20 旋转角度偏差对切换控制效果的影响

Fig. 20 The impact of rotation angle deviation on synchronous switching control strategy

4 结论

考虑到电网的运行工况可能会发生变化,本文提出一种同步切换控制策略来充分利用矢量控制方式和功率同步控制方式在不同运行环境下的优势,构造了一个灵活的交直流输电网络,提升了 VSC-MTDC 系统在不同运行环境下的稳定性。仿真结果表明:

- 1) 同步切换控制策略可以实现矢量控制方式和功率同步控制方式并存于同一个换流站。
- 2) 同步切换控制策略可以实现矢量控制方式和功率同步控制方式之间的无扰动切换。
- 3) 同步切换控制策略可以提升 VSC-MTDC 系统在不同运行工况下的稳定性。

本文虽然仅讨论了 2 种控制方式之间的同步切

换,但这种思想可以充分扩展到更多的控制方式,实现多种控制方式并存于同一换流站,不仅节省了换流站建设费用,而且提升了电网在复杂运行环境下系统的稳定性。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/volumn/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 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 Fuguang, Luo Xiang, Wei Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).
- [2] 徐忻,胡靖,石辉,等.基于电压源换流器的高压直流输电技术研究综述[J].广东电力,2012,25(5):6-10.
Xu Xin, Hu Jing, Shi Hui, et al. Review on research of high voltage dc transmission technology based on voltage source converter[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(5): 6-10(in Chinese).
- [3] De Toledo P F. Modeling and control of a line-commutated HVDC transmission system interacting with a VSC STATCOM[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2007.
- [4] 何向前,伍文俊,任碧莹,等.电压源换流器在电力系统中的应用[M].北京:机械工业出版社,2012:1-6.
- [5] 赵成勇.柔性直流输电建模和仿真技术[M].北京:中国电力出版社,2014:5-15.
- [6] Konishi H, Takahashi C, Kishibe H, et al. A consideration of stable operating power limits in VSC-HVDC systems[C]//Proceedings of the 7th International Conference on AC-DC Power Transmission. London, UK: IET, 2001: 102-106.
- [7] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [8] Zhang Lidong, Harnefors L, Nee H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [9] Guan Minyuan, Pan Wulue, Zhang Jing, et al. Synchronous generator emulation control strategy for voltage source converter(VSC)stations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3093-3101.
- [10] Zhang Lidong, Nee H P, Harnefors L. Analysis of stability limitations of a VSC-HVDC link using power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1326-1337.
- [11] Mitra P, Zhang Lidong, Harnefors L. Offshore wind integration to a weak grid by VSC-HVDC links using power-synchronization control: a case study[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 453-461.
- [12] Chen Yong, Hesse R, Turschner D, et al. Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters[C]// Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Spain: European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality, 2012.
- [13] 刘昇,徐政,唐庚,等.MMC-HVDC 联网及孤岛运行状态转换策略[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2152-2161.
Liu Sheng, Xu Zheng, Tang Geng, et al. Study on MMC-HVDC switching scheme between grid-connected and passive islanding mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2152-2161(in Chinese).
- [14] 管敏渊,张静,刘强,等.柔性直流输电系统的联网和孤岛运行通用控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(15):103-109.

- Guan Minyuan, Zhang Jing, Liu Qiang, et al. Generalized control strategy for grid-connected and island operation of VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 103-109(in Chinese).
- [15] Du Wenjuan, Bi Jingtian, Cao Jun, et al. A method to examine the impact of grid connection of the DFIGs on power system electromechanical oscillation modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(5): 3775-3784.
- [16] Alawasa K M, Mohamed Y A R I. Impedance and damping characteristics of grid-connected VSCs with power synchronization control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 952-961.
- [17] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 72-77.
- [18] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 39-55.
- [19] Pinto R T, Bauer P, Rodrigues S F, et al. A novel distributed direct-voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2429-2441.
- [20] 刘毅华. 电力系统故障检测新方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [21] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2179-2185. Wang Shuai, Bi Tianshu, Jia Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185 (in Chinese).
- [22] 行登江, 吴金龙, 王先为, 等. MMC-HVDC 系统直流断线故障特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1825-1832.
- Xing Dengjiang, Wu Jinlong, Wang Xianwei, et al. Analysis on characteristic of DC transmission line breakage fault in modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1825-1832(in Chinese).
- [23] 刘桂花, 马田源, 石桐, 等. 双谐波注入的弱电网阻抗在线检测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 132-139. Liu Guihua, Ma Tianyuan, Shi Tong, et al. On-line detection of weak grid impedance with dual harmonic current injection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 132-139(in Chinese).
- [24] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 633-647. Xin Huanhai, Zhang Feng, Yu Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 633-647(in Chinese).



付强

收稿日期: 2017-07-07。

作者简介:

付强(1993), 男, 博士, 主要研究方向为新能源电力系统, E-mail: 1197348393@qq.com;

杜文娟(1979), 女, 通信作者, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制、新能源电力系统, E-mail: 1376983331@qq.com。

(责任编辑 李兰欣)

附录

表 1 VSC-MTDC 系统的参数
Tab. 1 Parameters of the VSC-MTDC system

参数	数值
电力系统额定值	350 MVA
交流侧频率	50 HZ
变压器交流侧电压	400 kV
变压器直流侧电压	165 kV
直流电压	300 kV
PWM 频率	1500 HZ
交流侧电感 L	0.05 H
交流侧电感 L_1	0.5 H
交流侧电感 L_2	0.05 H
交流侧电感 \hat{L}	0.05 H
交流侧电阻 R	0.5 Ω
交流侧滤波器电阻	355 Ω
交流侧滤波器电感	0.009 43 H
交流侧滤波器电容	1.194 μF
直流换流站-1 侧电阻 R_{dc}	0.3 Ω
直流换流站-2 侧电阻 \hat{R}_{dc}	0.45 Ω
直流换流站-1 侧电感 L_{dc}	0.015 H
直流换流站-2 侧电感 \hat{L}_{dc}	0.045 H
直流换流站-1 侧电容 C	7.5 μF
直流换流站-2 侧电容 \hat{C}	22.5 μF