

# 电压源电流源混合型高压直流输电控制方法研究

郭春义\*, 刘文静, 赵成勇

华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

\* E-mail: chunyiguo@gmail.com

收稿日期: 2013-05-17; 接受日期: 2013-07-31

国家高技术研究发展计划(批准号: 2013AA050105)、国家自然科学基金(批准号: 51177042)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 13QN03)和 2012 年国家电网公司科技项目(批准号: XT71-12-015)资助

**摘要** 由传统电网换相换流器(line-commutated-converter, LCC)和电压源换流器(voltage source converter, VSC)构成的混合型高压直流输电(hybrid-HVDC), 结合了 LCC 和 VSC 的优势, 是一种新型拓扑, 具有广泛的应用前景. 研究了整流侧采用 VSC, 逆变侧采用 LCC 的混合直流输电系统, 建立了其数学模型. 针对其逆变侧 LCC 易发生换相失败的情况, 设计了新的抑制换相失败的协调控制策略, 即在整流侧 VSC 采用定直流电压控制的基础上设计低压限压控制, 逆变侧 LCC 采用包含低压限流的定直流电流控制的基础上加入定关断角备用控制. 在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 下进行了正常和故障情况下的仿真, 对比采用基本的控制策略和新的协调控制策略时系统的故障特性, 验证了所设计的控制策略可以有效降低换相失败发生的概率, 而且可以改善混合直流输电系统的故障恢复特性.

**关键词**

LCC-HVDC

VSC-HVDC

hybrid-HVDC

低压限压控制

定关断角备用控制

换相失败

传统电网换相高压直流输电(line-commutated-converter High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)以输电容量大, 有功功率快速可控, 线路造价低, 且没有交流线路的对地电容电流问题等特点得到了快速发展, 但由于其依赖受端电网运行, 在受端电网发生严重故障时, 通常不能发挥作用<sup>[1]</sup>. 随着电力电子器件和控制技术的发展, 出现了新型的全控型半导体器件—绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT). 20世纪90年代以后, 以全控型器件为基础的电压源换流器高压直流输电(voltage source converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)得到了快速发展. 正常运行时 VSC-HVDC 可以同时且相互独立控制有功功率、无功功率, 可以工

作在无源逆变方式, 不需要外加换相电压, 受端系统可以是无源网络; 但是其开关损耗较大、工程造价高, 目前在弱交流系统接入和新能源并网方案中具有优势<sup>[2]</sup>.

混合型高压直流输电(hybrid-HVDC)即一端采用 LCC, 另一端采用 VSC 的输电结构, 可以合理结合 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的优点<sup>[3]</sup>. 传统的 LCC-HVDC 输送容量大、电压等级高, 而目前在建 VSC-HVDC 工程的最高输送容量和最高电压等级也分别达到了 2×1000 MW<sup>[4]</sup>和 500 kV<sup>[5]</sup>, 虽然二者的容量和电压等级还有一定差距, 但是考虑到 VSC-HVDC 的发展现状和前景, 结合 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的混合直流输电将具有工程应用前景, 因此该课题

将具有重要的研究价值. 整流侧采用 LCC、逆变侧采用 VSC 的混合结构可以改善受端交流系统的运行特性, 同 VSC-HVDC 相比, 损耗与投资也降低很多, 目前关于 hybrid-HVDC 的研究多针对此结构的稳态运行特性、连接弱受端交流系统与无源网络、故障特性等方面<sup>[6-11]</sup>. 本文重点研究整流侧采用 VSC、逆变侧采用 LCC 的混合结构. 虽然其逆变侧可能发生换相失败, 但通过控制策略可以减小换相失败发生的概率; 目前新能源发电尤其以风力发电迅速发展, VSC 无需外加换相电压, 可以灵活控制交流母线电压, 此类 hybrid-HVDC 克服了 LCC 连接风电场时需外加换相电压的缺点, 同时减小了投资和损耗, 合理结合两者的优点, 在远距离海上风电的并网方案中具有独特的优势和竞争力, 是一种具有广泛前景的 hybrid-HVDC 结构.

针对此类 hybrid-HVDC, 国内外学者对其进行了有价值的研究. 文献[12]为连接海上风电场的此类混合结构设计了合理的控制策略, 仿真验证了风速变化和岸上 LCC 侧发生故障时的其控制策略的有效性. 文献[13]利用直接功率控制控制整流侧 VSC 的有功与无功, 无需内环, 具有快速动态响应, 便于处理外环不确定参数. 文献[14]在整流侧 VSC 定直流电压, 逆变侧 LCC 定直流电流中加入低压限流环节(voltage dependent current order limiter, VDCOL), 针对稳态和直流侧短路故障进行了仿真分析. 文献[15]针对其不能连接弱受端交流系统、易发生换相失败的问题, 将 LCC 改为 CCC(capacitor commuted converter, CCC). 而本文将从改善 hybrid-HVDC 控制策略的角度抑制换相失败故障的发生.

本文针对整流侧为 VSC, 逆变侧为 LCC 的 Hybrid-HVDC, 采用双极 hybrid-HVDC 结构, 以提高系统的供电可靠性; 建立了其数学模型, 用来分析系统特性的变化, 并在此模型的基础上设计了新的协

调控制策略, 即在整流侧 VSC 定直流电压控制的基础上加入低压限压控制(voltage dependent voltage order limiter, VDVOL), 逆变侧 LCC 包含 VDCOL 的定直流电流的基础上加入定关断角备用控制. 针对上述 hybrid-HVDC 结构与控制策略在 PSCAD/EMTDC 中进行了仿真验证, 结果表明采用新的协调控制策略时系统稳态运行特性良好, 可以有效降低换相失败发生的概率, 而且可以改善混合直流输电系统的故障恢复特性. 适用于此类 hybrid-HVDC 系统, 具有工程应用前景.

## 1 Hybrid-HVDC 结构与原理

### 1.1 Hybrid-HVDC 结构

本文研究的 hybrid-HVDC 拓扑结构如图 1 所示, 整流侧采用两组两电平 VSC 串联, 以提高输送容量. VSC 由换流变压器、换流电抗器、换流桥、直流电容器等组成. 逆变侧采用双极 12 脉动 LCC, 由换流变压器、滤波器、平波电抗器等组成. 所设计的 hybrid-HVDC 结构, 可以使 VSC 的电压等级与容量与 LCC 相匹配, 并且在直流线路发生单极故障时, 可以实现单极运行, 提高了系统的供电可靠性.

### 1.2 Hybrid-HVDC 运行原理

对于整流侧 VSC 而言, 可以通过控制相角  $\delta$  和换流器交流侧输出电压基波幅值  $U_{c1}$  (调制比  $M$ ) 控制电压源换流器与交流系统间交换的有功与无功功率<sup>[16]</sup>, 如下式所示.

$$\begin{cases} P_s = \frac{U_1 U_{c1}}{X} \sin \delta, \\ Q_s = \frac{U_1 (U_{c1} \cos \delta - U_1)}{X}, \end{cases} \quad (1)$$

其中  $X$  为换流变压器和换流电抗器的等值电抗.

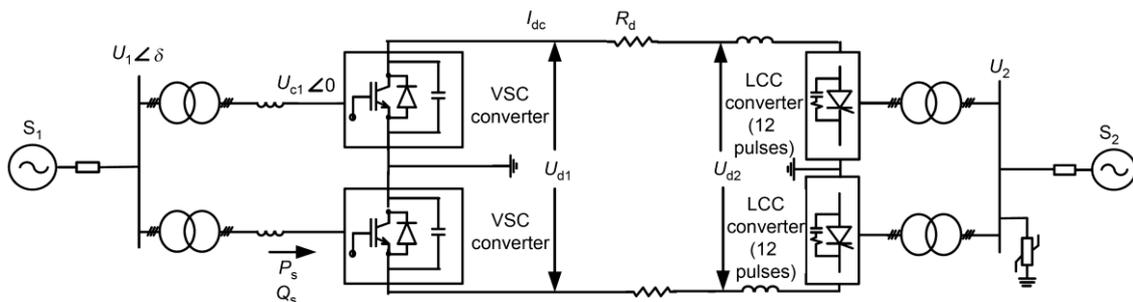


图 1 混合型高压直流输电的拓扑结构

采用 SPWM 调制方式时, 整流侧直流电压如下式所示:

$$U_{d1} = 2\sqrt{2}U_{c1} / \sqrt{3}M. \quad (2)$$

对于逆变侧 LCC 而言, 其可控量只有触发延迟角  $\alpha$  (触发超前角  $\beta = \pi - \alpha$ ), 逆变侧直流电压如下式所示:

$$U_{d2} = 1.35U_2 \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_r I_{dc}, \quad (3)$$

其中  $X_r$  为等值换相电抗.

逆变侧换相角  $\mu$  如下式所示:

$$\mu = \arccos \left( \cos \gamma - \frac{2X_r I_{dc}}{\sqrt{2}U_2} \right) - \gamma. \quad (4)$$

直流电流如下式所示:

$$I_{dc} = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R_d}, \quad (5)$$

其中  $R_d$  为直流线路电阻.

由于关断角  $\gamma = \beta - \mu$ , 由(3)~(5)式可以得出, 当逆变侧交流母线电压下降时, 造成逆变侧直流电压下降, 从而引起直流电流上升, 换相角  $\mu$  增大, 关断角  $\gamma$  减小, 可能发生换相失败.

将(5)式带入(4)式可以得到:

$$\mu = \arccos \left( \cos \gamma - \left( 2X_r \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R_d} \right) / (\sqrt{2}U_2) \right) - \gamma. \quad (6)$$

由(6)式可以看出整流侧直流电压  $U_{d1}$  也会对逆变侧换相角  $\mu$  产生影响,  $U_{d1}$  越小, 换相角  $\mu$  越小, 则为关断角  $\gamma$  留下裕度. 即整流侧 VSC 和逆变侧 LCC 通过直流侧相互耦合, 因此整流侧直流电压对换相失败也会产生影响, 为下文中低压限压控制 VDVOL 的设计提供了指导思想.

## 2 Hybrid-HVDC 的协调控制策略

### 2.1 Hybrid-HVDC 的基本控制策略设计

目前, 针对 VSC 的控制方式占主导地位的是具有快速电流响应的直接电流控制, 由外环电压控制和内环电流控制两个环构成<sup>[17]</sup>. 内环电流控制器用于实现换流器交流侧电流波形和相位的直接控制, 以快速跟踪参考电流. 外环电压控制则根据电压源换流器直流输电系统级控制目标可以实现定直流电压控制、定有功功率控制、定频率控制、定无功功率控制和定交流电压控制等控制目标<sup>[18]</sup>. 针对 LCC 的

控制方式, 其可控量为触发角  $\alpha$ , 可以采用 PI 调节器调节 LCC 的直流电压、直流电流、直流功率或者关断角  $\gamma$ .

由于此类 hybrid-HVDC 结构常用于连接风电场, 因此本文选择 VSC 中无功类控制选择定交流电压控制<sup>[19]</sup>, 而考虑 VSC 直流侧相当于一个直流电压源, 因此有功类控制选择定直流电压控制, 可以灵活地在 VSC 侧控制直流电压从而控制有功功率. 考虑 LCC 直流侧相当于一个直流电流源, 因此换流站选择定直流电流控制, 并加入 VDCOL: 其主要任务是在直流电压或交流电压跌落到某个指定值时对直流电流指令进行限制<sup>[20]</sup>, 可以减小换相失败发生的可能性, 帮助直流系统在交流或直流故障后的快速恢复, 避免连续换相失败引起的阀应力.

### 2.2 Hybrid-HVDC 抑制换相失败的协调控制策略设计

针对整流侧为 VSC, 逆变侧为 LCC 的 hybrid-HVDC 逆变侧易发生换相失败的情况, 本文在 2.1 节中基本控制策略的基础上, 结合其数学模型与 LCC 换相原理, 设计了抑制 hybrid-HVDC 换相失败的协调控制策略.

#### 2.2.1 LCC 侧定关断角备用控制

本文设计的逆变侧 LCC 控制器如图 2 所示. 根据 LCC 侧定直流电流 PI 控制器的特性, 当直流电流增大时, 将减小逆变侧触发超前角  $\beta_1$ , 造成关断角  $\gamma$  更小, 增加换相失败发生的概率. 因此, 在 LCC 侧加入定关断角控制, 作为定直流电流的备用控制. 定关断角控制器在故障发生后, 关断角  $\gamma$  减小, 将增大触发超前角  $\beta_2$ , 从而为关断角  $\gamma$  留下裕度. 两个控制器产生的  $\beta_1$  与  $\beta_2$  取最大值  $\beta$  后, 用于触发换流器. 需要注意设计控制器时, 正常工作时的  $\beta_2$  略小于  $\beta_1$  以工作于定直流电流模式, 但  $\beta_1$  与  $\beta_2$  之间的差值不应过

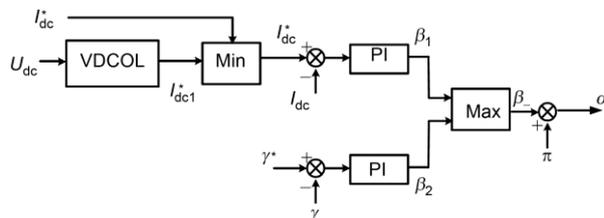


图 2 含有定关断角备用控制的 LCC 侧控制框图

小以减小控制模式的频繁切换, 但同时也不应过大以避免控制模式发生切换时造成 $\beta$ 跌落过多. 此控制策略在故障较轻时可以抑制 $\beta$ 的减小, 为 $\gamma$ 留下裕度, 降低换相失败发生的概率.

### 2.2.2 VSC 侧 VDVOL 控制与参数设计

#### 1) VDVOL 控制原理

本文设计的的整流侧 VSC 控制器如图 3 所示. 在整流侧 VSC 定直流电压控制中加入 VDVOL, 其原理为当检测到逆变侧 LCC 交流母线发生故障时, 启动整流侧 VDVOL, 将直流电压参考值降低, 其降低程度取决于逆变侧交流母线电压下降程度, 系统工作于降压运行方式. 故障消失且系统稳定后, 将直流电压整定值上升至额定值, 恢复功率传输. 参考(6)式, 此控制策略可以在故障时减小  $U_{d1}$ , 抑制直流电流的上升, 当故障较轻时可以降低换相失败发生的概率; 当故障较严重, 换相失败不可避免时, 可以帮助系统快速恢复.

#### 2) VDVOL 参数设计

由(3)和(5)式可得:

$$U_{d1} = 1.35 \cos \alpha U_2 + I_{dc} (R_d - (3/\pi) X_r). \quad (7)$$

即 VSC 侧直流电压  $U_{d1}$  参考值应与逆变侧交流母线电压  $U_2$  呈线性关系. 为预防换相失败, VDVOL 的参数设计见下式所示:

$$\Delta U_{d1} = K_{VDVOL} 1.35 \cos \alpha \Delta U_2. \quad (8)$$

通过仿真与系统分析, 考虑一定的裕度以及电压波动范围后, 确定 VDVOL 的各转折点与参数设置 (当  $U_2$  下降到一定程度时,  $U_{d1}$  继续下降不能抑制换相失败的发生, 且不经济). 以本文算例为例, 得到 VDVOL 的参数设计如下式所示, 外特性曲线如图 4 所示, 其中  $K_{VDVOL} = 2.5$ .

$$U_{d1} = \begin{cases} 1.0 \text{ p.u.}, & U_2 \geq 0.95 \text{ p.u.}; \\ (1 - K_{VDVOL} 1.35 \cos \alpha \Delta U_2) \text{ p.u.}, & 0.85 \text{ p.u.} < U_2 < 0.95 \text{ p.u.}; \\ 0.5 \text{ p.u.}, & U_2 \leq 0.85 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (9)$$

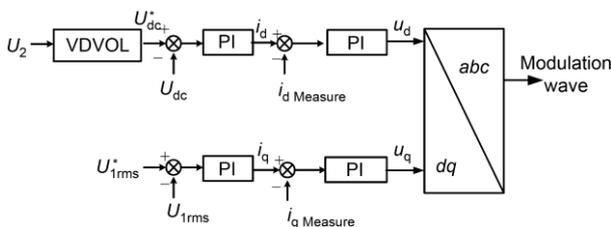


图 3 含有 VDVOL 的 VSC 侧控制框图

综合上述控制策略, 可以得到混合直流输电系统的  $U_d-I_d$  特性曲线如图 5 所示.

## 3 仿真验证及分析

### 3.1 仿真算例说明

本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建上述结构的混合直流输电仿真模型, 选定混合直流系统参数如表 1 所示, 正常运行时逆变侧 LCC 超前触发角  $\beta_1 = 34.4^\circ$  (定直流电流控制),  $\beta_2 = 32.7^\circ$  (定关断角备用控制),  $\gamma = 17^\circ$ . 定义故障容量 (Fault Level,  $F_L$ ) 如下式所示<sup>[21]</sup>, 其值越大, 说明故障越严重, 可以用来表征故障的严重程度, 临界故障容量指系统恰好发生换相失败时的故障容量:

$$F_L = (U^2 / Z) / P \times 100\%, \quad (10)$$

其中  $U$  为交流母线电压有效值,  $Z$  为故障阻抗值,  $P$  为直流系统的额定功率. 同时, 使用更加直观的单相电压跌落幅值  $\Delta U_A$ , 即故障发生后一个周波内, 故障相电压幅值跌落幅度, 表征故障的严重程度.

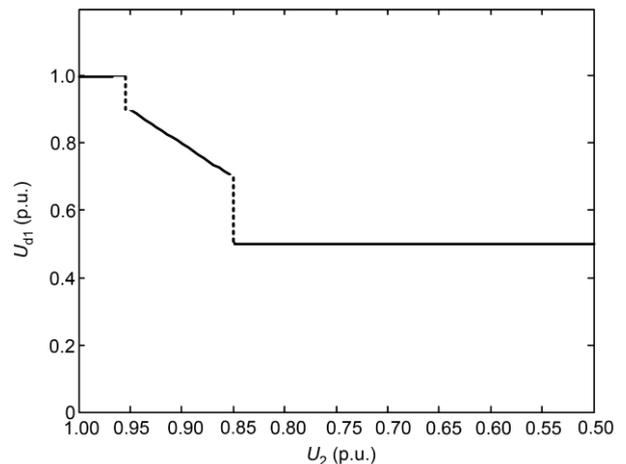


图 4 VDVOL 外特性曲线图

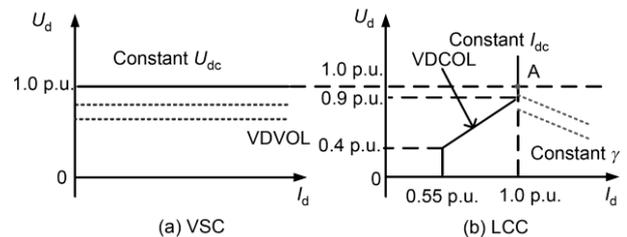


图 5 混合直流输电系统稳态  $U_d-I_d$  特性曲线 (正常运行时稳态运行点为点 A)

表1 混合直流输电仿真系统主要参数

Item	Value
DC voltage	$\pm 400$ kV
Rated active power	800 MW
DC current	1 kA
Frequency	50 Hz
Rectifier AC system	345 kV (SCR=5)
Inverter AC system	230 kV (SCR=2.5)
Constant extinction angle control $\gamma^*$	$14^\circ$

针对整流侧为 VSC, 逆变侧为 LCC 的 hybrid-HVDC, 需验证本文所设计的协调控制策略的有效性, 将控制策略分为如下 2 种. 1) 基本控制策略: 整流侧 VSC 定直流电压、定交流电压控制, 逆变侧 LCC 包含 VDCOL 的定直流电流控制; 2) 抑制换相失败的协调控制策略: 整流侧 VSC 包含 VDVOL 的定直流电压、定交流电压控制, 逆变侧 LCC 包含 VDCOL 的定直流电流的基础上加入定关断角的备用控制.

本文在 PSCAD 中对以下情况进行了仿真, 以验证设计的协调控制策略的有效性:

1) 稳态运行时直流电压参考值阶跃变化;

2) 逆变侧交流母线发生单相经电阻接地故障, 根据故障容量的大小和单相电压跌落幅值分别验证设计的协调控制策略可以降低换相失败发生的概率和改善系统的恢复特性.

a)  $F_L=44.1\%$ ,  $\Delta U_A=7.4\%$ ;

b)  $F_L=47.9\%$ ,  $\Delta U_A=8.0\%$ ;

c)  $F_L=91.8\%$ ,  $\Delta U_A=11.3\%$ .

## 3.2 仿真验证及分析

### 3.2.1 Hybrid-HVDC 稳态运行时直流电压参考值阶跃变化情况

稳态运行时, VSC 侧定直流电压控制: 初始参考值设为 800 kV, 3 s 时将参考值降为 600 kV, 3.5~4 s 将参考值斜坡上升至 800 kV; LCC 侧为包含 VDCOL 的定直流电流控制: 初始参考值为 1 kA, 随着直流电压的降低 VDCOL 发挥作用, 直流电流给定值也会相应降低. VDVOL 和定关断角备用控制在稳态时不起作用. 仿真结果如图 6 所示.

Hybrid-HVDC 稳态运行时, 采用本文设计的协调控制策略的稳态运行特性良好, 并且可以通过 VSC 侧独立调节直流电压(或通过 LCC 侧调节直流电流)来控制直流线路上传输的有功功率, 控制方式灵活.

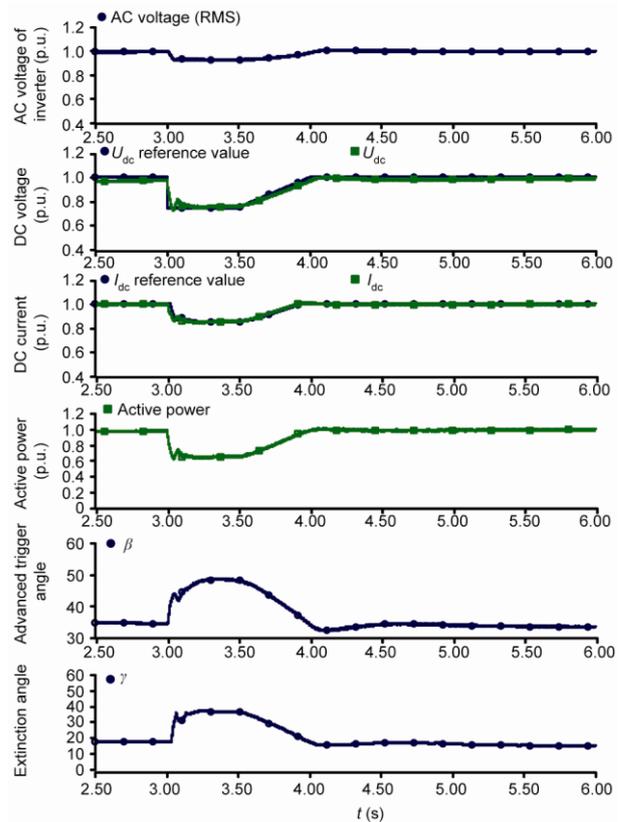


图6 系统阶跃响应特性

### 3.2.2 逆变侧交流母线发生单相经电阻接地故障情况

1) 3 s 时逆变侧交流母线发生单相经电阻接地故障, 故障容量  $F_L=44.1\%$ (临界故障容量),  $\Delta U_A=7.4\%$ , 故障持续时间 0.1 s. 采用基本控制策略与抑制换相失败的协调控制策略的仿真结果分别如图 7(a), (b)所示.

采用基本控制策略时, 故障后逆变侧触发超前角  $\beta_1$  减小, 关断角  $\gamma$  降到 0, 系统发生连续换相失败, 难以从故障中恢复. 采用抑制换相失败的协调控制策略时, 故障后逆变侧定关断角备用控制发挥作用, 增大触发超前角  $\beta_2$ , 为关断角  $\gamma$  留下裕度; 整流侧因  $U_2$  未下降到启动 VDVOL 的参考值, 故未发挥作用. 所设计的控制策略成功预防了换相失败的发生. 说明故障容量较小, 即电压跌落程度较小时, 采用本文设计的协调控制策略可以抑制换相失败的发生, 即降低了换相失败发生的概率.

2) 3 s 时逆变侧交流母线发生单相经电阻接地故障, 故障容量  $F_L=47.9\%$ ,  $\Delta U_A=8.0\%$ , 故障持续时间

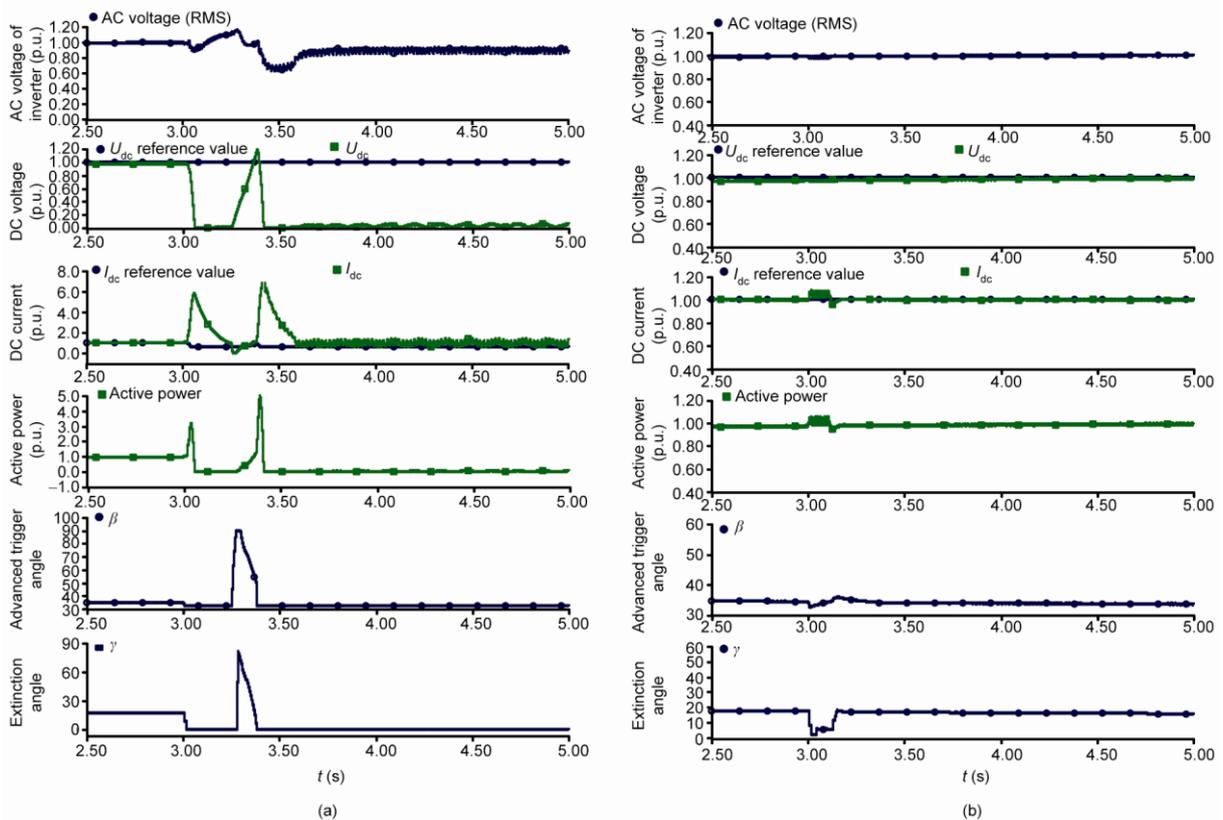


图 7 故障容量  $F_L=44.1\%$ ,  $\Delta U_A=7.4\%$  时系统运行特性

(a) 基本控制策略; (b) 抑制换相失败的协调控制策略

0.1 s. 采用基本控制策略时系统会发生连续换相失败, 直流电压降低、直流电流增大, 系统难以从故障中恢复, 仿真结果类似于图 7(a). 采用抑制换相失败的协调控制策略时的仿真结果如图 8 所示.

随着故障容量与电压跌落程度的增大, 采用基本控制策略时 hybrid-HVDC 会发生连续换相失败; 采用抑制换相失败的协调控制策略时, 逆变侧定关断角备用控制发挥作用, 增大触发超前角  $\beta_2$ , 从而抑制关断角  $\gamma$  的减小; 同时整流侧 VDVOL 发挥作用, 检测到逆变侧 LCC 发生故障后, 参考(9)式立即将整流侧 VSC 的直流电压参考值降至 0.8 p.u., 以抑制直流电流的上升, 持续一段时间稳定且故障消失后, 将直流电压上升至 1.0 p.u., 避免了换相失败的发生, 系统可以恢复正常有功传输. 说明在一定故障容量下, 采用本文设计的协调控制策略可以抑制换相失败的发生, 即降低了换相失败发生的概率.

3) 3 s 时逆变侧交流母线发生单相经电阻接地故障,  $F_L=91.8\%$ ,  $\Delta U_A=11.3\%$ , 故障持续时间 0.1 s. 采

用基本控制策略时系统会发生连续换相失败, 直流电压降低、直流电流增大, 系统难以从故障中恢复, 仿真结果类似于图 7(a). 采用抑制换相失败的协调控制策略时的仿真结果如图 9 所示.

随着故障容量电压跌落程度的进一步增大, 采用基本控制策略时 hybrid-HVDC 会发生连续换相失败, 难以从故障中恢复; 采用抑制换相失败的协调控制策略时, 由于故障容量较大, 系统不可避免的发生换相失败. 但故障后逆变侧定关断角备用控制发挥作用, 增大触发超前角  $\beta_2$ ; 同时整流侧 VSC 包含 VDVOL 的定直流电压控制发挥作用, 检测到逆变侧 LCC 发生故障后, 参考(9)式立即将整流侧 VSC 的直流电压参考值降至 0.58 p.u., 以抑制直流电流的上升, 持续一段时间稳定且故障消失后, 将直流电压上升至 1.0 p.u.使系统从故障中恢复, 可以恢复正常的有功传输. 说明在故障容量较大时, 即电压跌落程度较大时, 采用本文设计的协调控制策略可以帮助系统从换相失败故障中恢复, 即故障恢复能力提高.

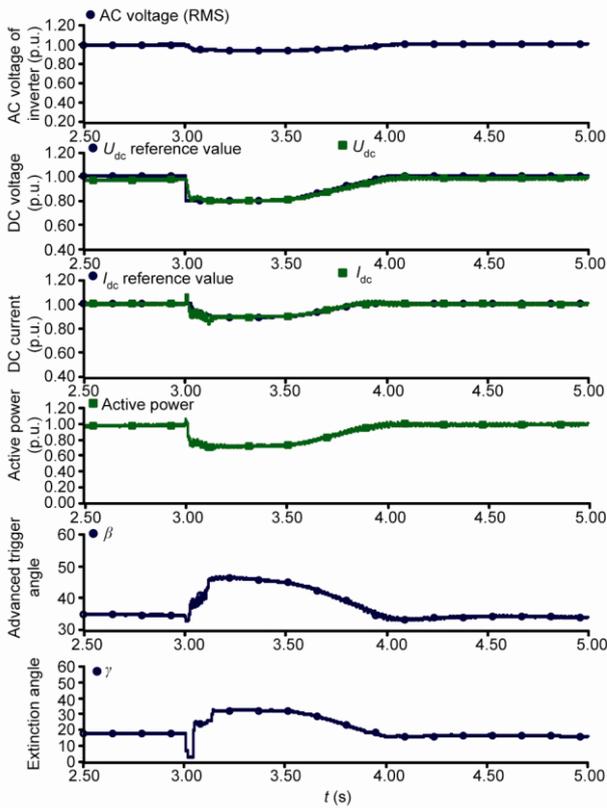


图8 故障容量  $F_L=47.9\%$ ,  $\Delta U_A=8.0\%$  时采用抑制换相失败的协调控制策略的系统运行特性

综上所述, 可以得出在不同的故障容量下, 采用基本控制策略与抑制换相失败的协调控制策略的效果, 具体对比如表2所示, 其中CF表示会发生换相失败(Communication Failure, CF), “×”表示不会发生换相失败。

表2 采用不同控制策略的 hybrid-HVDC 在不同故障容量下的系统运行特性

Fault side	$F_L$	$\Delta U_A$	Basic control method	Coordinated control method to suppress commutation failure
Inverter	44.1%	7.4%	CF, difficult to restore	×(constant extinction angle control)
Inverter	47.9%	8.0%	CF, difficult to restore	×(constant extinction angle control & VDVL)
Inverter	91.8%	11.3%	CF, difficult to restore	CF, restore to normal state (constant extinction angle control & VDVL)

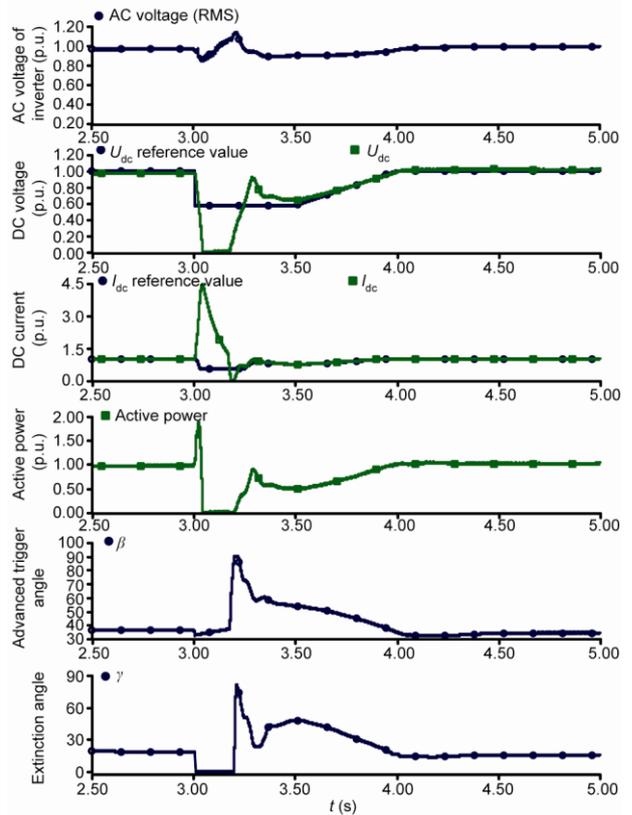


图9 故障容量  $F_L=91.8\%$ ,  $\Delta U_A=11.3\%$  时采用抑制换相失败的协调控制策略的系统运行特性

#### 4 结论

1) 本文研究了整流侧采用 VSC、逆变侧采用 LCC 的混合直流输电系统, 建立了稳态数学模型, 设计了基本控制策略。

2) 为降低该混合直流输电系统换相失败的发生概率, 在 hybrid-HVDC 数学模型的基础上, 提出了新的抑制换相失败的协调控制策略, 即在整流侧 VSC 采用定直流电压控制的基础上设计低压限压控制, 逆变侧 LCC 采用包含低压限流的定直流电流控制的基础上加入定关断角备用控制。

3) 为验证所提出的协调控制策略, 在 PSCAD/EMTDC 中进行了仿真对比分析。结果表明, 所设计的协调控制策略可以有效降低换相失败发生的概率, 而且可以改善混合直流输电系统的故障恢复特性。

## 参考文献

---

- 1 赵畹君. 高压直流输电工程技术. 北京: 中国电力出版社, 2004
- 2 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电的发展和展望. 电力系统自动化, 2003, 27: 1-5
- 3 Li G K, Li G Y, Liang H F, et al. Operational mechanism and characteristic analysis of novel hybrid HVDC system. In: International Conference on Power System Technology. Chongqing: 2006. 1-6
- 4 SIEMENS. Ready for the future: Siemens erects power converter stations for HVDC link between France and Spain as part of the Trans-European Network. (2011-01-12). [2011-10-18]. [http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2011/power\\_transmission/ept201101032.htm](http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2011/power_transmission/ept201101032.htm)
- 5 ABB Group. Skagerrak HVDC Interconnections. (2011-02-11). [2011-10-18]. <http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/448A5-ECA0D6E15D3C12578310031E3A7.aspx>
- 6 Guo C Y, Zhao C Y. Supply of an entirely passive ac network through a double-infeed HVDC system. IEEE T Power Electron, 2010, 25: 2835-2841
- 7 郭春义, 赵成勇, Allan Montanari, 等. 混合双极高压直流输电系统的特性研究. 中国电机工程学报, 2012, 32: 98-104
- 8 潘武略. 新型直流输电系统损耗特性及降损措施研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2008
- 9 薛英林, 徐政, 潘武略, 等. 电流源型混合直流输电系统建模与仿真. 电力系统自动化, 2012, 36: 98-103
- 10 Iwata Y, Tanaka S, Sakamoto K, et al. Simulation study of a hybrid HVDC system composed of a self-commutated converter and a line-commutated converter. In: 6th International Conference on AC and DC Power Transmission. London: 1996. 381-386
- 11 Omar K, Vijay K S. A hybrid HVDC transmission system supplying a passive load. In: Electric Power and Energy Conference (EPEC). Halifax: 2010. 1-5
- 12 Torres-Olguin R E, Marta M, Undeland T. Hybrid HVDC connection of large off shore wind farms to the AC grid. In: Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium. Hangzhou, 2012. 1591-1597
- 13 Torres-Olguin R E, Marta M, Undeland T. A direct power control for hybrid HVDC transmission Systems. In: 2011 IEEE Trondheim PowerTech. Trondheim, 2011. 1-6
- 14 孙长江, 施刚, 彭思敏. 混合型高压直流输电系统及其控制策略. 2012 年中国电机工程学会直流输电与电力电子专委会学术年会. 北京, 2012
- 15 Torres-Olguin R E, Marta M, Undeland T. A model-based controller in rotating reference frame for Hybrid HVDC. In: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Atlanta: 2010. 1578-1584
- 16 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术. 北京: 中国电力出版社, 2010
- 17 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. 中国电机工程学报, 2002, 22: 17-22
- 18 赵成勇, 李金丰, 李广凯. 基于有功功率和无功功率独立调节的 VSC-HVDC 控制策略. 电力系统自动化, 2005, 29: 20-24
- 19 Torres-Olguin R E, Marta M, Undeland T. Offshore wind farm grid integration by VSC Technology with LCC-Based HVDC transmission. IEEE T Sust Energ, 2012, 3: 809-907
- 20 徐政. 交直流电力系统动态行为分析. 北京: 机械工业出版社, 2004
- 21 Guo C Y, Zhang Y, Gole A M, et al. Analysis of dual-infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC. IEEE T Power Deliver, 2012, 27: 1529-1537