# 提高暂态稳定性的VSC-HVDC功率附加滑模控制方法

姜惠兰,李 政,肖 瑞,李希钰

(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:利用直流功率快速可控的特点提高交流系统的暂态稳定性已成为交直流系统的重要研究方向。以多 机交直流系统为研究对象,提出了一种提高暂态稳定性的柔性直流输电(VSC-HVDC)有功控制方法。借助 VSC-HVDC 接地导纳模型和对节点导纳矩阵的收缩,推导包含其整流站功率特性和拓扑信息的系统等值机 械功率变化量的表达式,建立了分析整流站有功附加量与反映系统暂态稳定性的等值功角的数学模型。针 对二者之间的非线性关系,采用非奇异 Terminal 滑模控制,以等值功角变化速度及加速度建立切换面,并依 据建立的数学模型,确定出可以加快系统趋近于稳定的整流站有功附加量的控制策略。对所提控制方法的 有效性进行仿真分析,结果表明,所提方法可以改善系统等值功角的变化,加快系统恢复稳定的速度。 关键词:柔性直流输电;多机交直流系统;暂态稳定性;节点导纳矩阵;滑模控制

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202111003

# 0 引言

柔性直流输电(VSC-HVDC)具有非同步联络能力强、功率调节迅速及无换相失败等优点,在新能源并网及区域电力系统互联等方面被广泛应用<sup>[1]</sup>。交流系统故障下的暂态功角失稳会对系统的安全运行造成严重影响,在交直流互联系统中,通过控制直流功率提高系统的暂态稳定性,已成为保证系统安全运行的有效手段<sup>[2]</sup>。因此研究提高系统暂态稳定性的直流功率附加控制策略具有重要意义。

分析直流功率对交流系统暂态稳定性的影响和 采取附加控制策略提高系统暂态稳定性已有一些研 究成果。文献[3]基于扩展等面积准则(EEAC)通过 加速、减速面积定性分析直流功率对系统暂态稳定 性的影响,但未定量分析二者的关系。文献[4]在多 端交直流互联系统中提出了一种基于最优控制理论 紧急功率调制方案。但紧急功率支援是开环控制, 仅对特定系统结构和特定故障位置起作用,难以实 现不同网络拓扑和故障下的稳定辅助功能。文献 [5]通过对渝鄂背靠背直流工程进行时域仿真得到 交流故障情况下的直流功率调制策略。但是通过实 际网架结构进行仿真得出的控制策略,只对该网架 结构起作用,导致控制策略适用性较差。

交直流互联系统具有强非线性特点,基于线性 控制理论设计的直流功率附加控制策略<sup>60</sup>,会因系 统运行状态的改变导致其偏离稳态运行点,使控制 效果变差,因而一些非线性控制方法被用来设计直 流附加控制策略。文献[7]在多区域交直流混联系

收稿日期:2021-01-11;修回日期:2021-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477115)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477115)

统中基于协同控制理论设计了直流附加控制器,并 通过仿真验证了控制器的有效性。文献[8-9]构造 基于 Lyapunov 能量函数的控制器,通过快速调节直 流功率改善了交流系统的功角稳定性。文献[10]建 立了多区域交直流混联系统的多状态 Markov模型, 以此提出了基于逆最优反推控制理论的直流附加控 制策略,仿真证明了该策略的有效性。文献[11]设 计了基于 Bang-Bang控制的直流功率附加控制器,提 高了系统暂态稳定性。但以上研究多针对单机无穷 大和双机系统进行理论分析和设计直流附加控制策 略,缺少理论上从多机系统入手分析直流功率对系 统暂态稳定性的影响,在设计控制策略时,所用交直 流互联数学模型过于简单,未量化分析直流功率与 多机系统暂态稳定性之间的关系。

针对以往研究的不足,本文从基于 VSC-HVDC 的多机交直流异步互联系统出发,综合考虑 VSC-HVDC 功率特性和网络拓扑结构对系统暂态稳定性 的影响。依据 EEAC,借助 VSC-HVDC 等效导纳模 型,通过推导包含 VSC-HVDC 整流站功率特性和拓 扑信息的系统等值机械功率变化量的表达式,建立 了多机交直流异步互联系统的数学模型,寻找到整 流站有功附加量与反映系统暂态稳定性的等值功角 之间的量化关系。在此基础上,通过将等值功角变 化速度及加速度作为状态变量建立切换面,并采用 基于指数趋近律的非奇异 Terminal 滑模控制,制定 VSC-HVDC 整流站有功附加量的控制策略,该控制 策略通过加快系统趋近稳定点来达到提高系统暂态 稳定性的目的。

# 1 VSC-HVDC对多机系统暂态稳定的影响机理

# 1.1 VSC-HVDC 对多机系统暂态稳定的影响途径 当交流系统发生故障时,作用在同步机转子上

的机械转矩与电磁转矩会失去平衡,使同步机转子加速或减速,导致功角失稳,造成暂态稳定性问题。 VSC-HVDC通过换流站与交流电网相连,当交流系统遭受大扰动时,VSC-HVDC可以通过改变与交流电网进行交换的功率来影响系统内同步机输出的电磁功率,进而影响系统的暂态稳定性。然而,对于多同步机系统而言,VSC-HVDC对同步机电磁功率的影响还与网络拓扑结构有关,需要明晰VSC-HVDC对不同位置同步机电磁功率影响的不同特征,才能准确分析VSC-HVDC对系统暂态稳定性的影响。

由于VSC-HVDC对系统暂态功角的影响体现在 与电网交换的功率上,可以将VSC-HVDC功率外特 性等效为动态接地导纳模型<sup>[12]</sup>,则VSC-HVDC整流 站的等效导纳模型的数学表达式见式(1)。

$$y_{\rm dc} = g_{\rm dc} + jb_{\rm dc} = \frac{P_{\rm dc}}{U_H^2} + j\frac{Q_{\rm dc}}{U_H^2}$$
(1)

式中: $y_{de}$ 为整流站的等效导纳; $g_{de}$ 和 $b_{de}$ 分别为等效 电导和电纳; $P_{de}$ 和 $Q_{de}$ 分别为整流站吸收的有功和 无功功率; $U_{H}$ 为整流站并网点电压。

#### 1.2 多机交直流异步互联系统等效转子运动方程

交直流异步互联系统结构如图1所示。区域 1的多机系统通过VSC-HVDC输电装置与交流电网 相连。



图1 交直流异步互联系统结构示意图

# Fig.1 Structural schematic diagram of AC / DC asynchronous interconnection system

当图1中区域1内的交流系统发生故障时,根据 EEAC<sup>[13]</sup>,可将受扰同步机划分为2个同步机群,分 别为领先群*S*和余下群*A*。将网络中所有节点分为领 先群*S*和余下群*A*的同步机内电势节点、VSC-HVDC 整流站并网节点*H*以及其余负荷节点。通过收缩处 理消去负荷节点,得到只包含同步机内电势节点和整 流站并网节点的系统节点电压方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SS} & \mathbf{Y}_{SA} & \mathbf{Y}_{SH} \\ \mathbf{Y}_{AS} & \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{AH} \\ \mathbf{Y}_{HS} & \mathbf{Y}_{HA} & \mathbf{Y}_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{S} \\ \mathbf{E}_{A} \\ \mathbf{U}_{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{S} \\ \mathbf{I}_{A} \\ \mathbf{I}_{H} \end{bmatrix}$$
(2)

式中:导纳矩阵中对角线元素 $Y_{ss}$ 、 $Y_{AA}$ 、 $Y_{HH}$ 为节点自导纳;导纳矩阵中非对角线元素为节点间互导纳;  $E_s$ 、 $E_A$ 、 $U_H$ 为节点电压; $I_s$ 、 $I_A$ 、 $I_H$ 为节点电流。

根据式(1),将VSC-HVDC整流站等效为接地导纳后,其注入电流 $I_{\mu}$ 变为0,节点H的自导纳修正为:

 $Y_{HH} = (G_0 + jB_0) + (g_{dc} + jb_{dc})$  (3) 式中: $G_0 \pi B_0$ 分别为消去负荷节点后节点H的自电导和自电纳。 对修改后的节点电压方程进行再次收缩,只保 留同步机内电势节点:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{Ss}^{\prime} & \mathbf{Y}_{SA}^{\prime} \\ \mathbf{Y}_{As}^{\prime} & \mathbf{Y}_{AA}^{\prime} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{s} \\ \mathbf{E}_{A} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{S-A}^{\prime} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{s} \\ \mathbf{E}_{A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{s} \\ \mathbf{I}_{A} \end{bmatrix}$$
(4)

式中:导纳矩阵中对角线元素 Y'ss、Y'AA 为修改后方程 的节点自导纳;导纳矩阵中非对角线元素为修改后 方程的节点间互导纳。这样,系统的节点导纳矩阵 Y'sa变为:

$$\mathbf{Y}_{S-A}' = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SS} & \mathbf{Y}_{SA} \\ \mathbf{Y}_{AS} & \mathbf{Y}_{AA} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SH} \mathbf{Y}_{HH}^{-1} \mathbf{Y}_{HS} & \mathbf{Y}_{SH} \mathbf{Y}_{HH}^{-1} \mathbf{Y}_{HA} \\ \mathbf{Y}_{AH} \mathbf{Y}_{HH}^{-1} \mathbf{Y}_{HS} & \mathbf{Y}_{AH} \mathbf{Y}_{HH}^{-1} \mathbf{Y}_{HA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{SS} & \mathbf{Y}_{SA} \\ \mathbf{Y}_{AS} & \mathbf{Y}_{AA} \end{bmatrix} - \Delta \mathbf{Y}_{H}$$
(5)

将 $\Delta Y_{\mu}$ 定义为节点导纳矩阵的修正矩阵:

$$\Delta Y_{H} = [\Delta G_{ij} + j\Delta B_{ij}] \tag{6}$$

式中: $\Delta G_{ij}$ 和 $\Delta B_{ij}$ 分别为节点间的修正电导和修正电 纳。由式(5)可知,通过对节点电压方程的修正和收 缩处理,将系统网络拓扑信息和VSC-HVDC整流站 的功率特性揉进了修正矩阵中,将VSC-HVDC整流 站对于不同拓扑位置同步机电磁功率的影响转化为 对该节点自导纳和互导纳的影响。

根据式(4)、(6)和 EEAC 可得反映多机交直流 异步互联系统暂态稳定性的等效转子运动方程为:

$$M_{SA} \frac{\mathrm{d}^{2} \delta_{SA}}{\mathrm{d}t^{2}} = P_{\mathrm{m},SA} + P_{H} - P_{\mathrm{c}} - P_{\mathrm{max}} \sin(\delta_{SA} - \gamma) = P_{\mathrm{meq}} - P_{\mathrm{c}} - P_{\mathrm{max}} \sin(\delta_{SA} - \gamma)$$
(7)

$$\begin{cases} P_{c} = \frac{M_{A} \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} E_{i} E_{k} G_{ik} - M_{S} \sum_{j=1}^{m} \sum_{l=1}^{m} E_{j} E_{l} G_{jl}}{M_{S} + M_{A}} \\ P_{max} = \sqrt{\left(\frac{M_{A} - M_{S}}{M_{S} + M_{A}} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} E_{i} E_{j} G_{ij}\right)^{2} + \left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} E_{i} E_{j} B_{ij}\right)^{2}} \end{cases}$$
(8)

式中: $M_{sA}$ 为S群相对A群的转动惯量; $\delta_{sA}$ 为转子角;  $P_{m,SA}$ 为等值机械功率; $P_{e}$ 为功率偏移值; $P_{max}$ 为功率 极限值; $\gamma$ 为转子偏移角; $P_{m,eq}$ 为系统等效机械功率;  $M_{s}$ 、 $M_{A}$ 分别为S群和A群的等效转动惯量;n、m分别 为S群和A群中同步机台数; $G_{ij}$ 、 $G_{ik}$ 、 $G_{jj}$ 为节点间电 导; $B_{ij}$ 为节点间电纳; $E_{i}$ 、 $E_{k}$ 、 $E_{j}$ 、 $E_{l}$ 为同步机内电势; i、k、j、l为同步机节点编号; $P_{il}$ 为VSC-HVDC对系统 等值电磁功率造成影响的部分,其表达式如式(9) 所示。

$$P_{H} = \frac{M_{A}}{M_{T}} \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} E_{i} E_{k} \Delta G_{ik} - \frac{M_{S}}{M_{T}} \sum_{j=1}^{m} \sum_{l=1}^{m} E_{j} E_{l} \Delta G_{jl} + \frac{M_{A}}{M_{T}} \sum_{i=1}^{n} \sum_{l=1}^{n} E_{i} E_{l} (\Delta B_{il} \sin \delta_{SA} + \Delta G_{il} \cos \delta_{SA}) + \frac{M_{S}}{M_{T}} \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} E_{j} E_{k} (\Delta B_{jk} \sin \delta_{SA} - \Delta G_{jk} \cos \delta_{SA})$$
(9)

式中: $M_T$ 为S群和A群的等效转动惯量之和; $\Delta G_{ik}$ 、  $\Delta G_{il}$ 、 $\Delta G_{il}$ 、 $\Delta G_{ik}$ 和 $\Delta B_{il}$ 、 $\Delta B_{ik}$ 分别为节点间的修正电导 和修正电纳。为便于分析,本文将 $P_{H}$ 视为系统等值 机械功率变化量,并将其与系统等值机械功率 $P_{m.s.M}$ 合并为 $P_{m.eq}$ , $P_{H}$ 变化所导致等效机械功率的变化会 改变系统的加速能量或减速能量,从而影响系统的 功角稳定性。

# 2 整流站功率与P<sub>H</sub>的量化关系

由式(9)可知,VSC-HVDC整流站的等效电导g<sub>de</sub> 和电纳b<sub>de</sub>隐藏在各节点导纳的修正量中,需要进一 步探求整流站功率和网络拓扑对系统等值机械功率 变化量P<sub>u</sub>的影响特征,以实现定量分析整流站有功 和无功功率对系统暂态稳定性的影响。

考虑到同步机有较强的励磁能力,维持其暂态内电势不变<sup>[14]</sup>。同步机内电势幅值取标幺值*E<sub>i</sub>*=1 (*i*=1,2,…),并考虑到节点导纳矩阵的对称性,将式 (9)改写为式(10)所示矩阵形式,式中下标(*i*,*j*)表 示矩阵中第*i*行第*j*列元素。

$$P_{H} = \frac{M_{A}}{M_{T}} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} \operatorname{Re} \left[ Y_{SH} Y_{HH}^{-1} Y_{HS} \right]_{(i,j)} - \frac{M_{S}}{M_{T}} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \operatorname{Re} \left[ Y_{AH} Y_{HH}^{-1} Y_{HA} \right]_{(i,j)} + \frac{M_{A} - M_{S}}{M_{T}} \cos \delta_{SA} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \operatorname{Re} \left[ Y_{SH} Y_{HH}^{-1} Y_{HA} \right]_{(i,j)} + \sin \delta_{SA} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \operatorname{Im} \left[ Y_{AH} Y_{HH}^{-1} Y_{HS} \right]_{(i,j)}$$
(10)  
 $\Im \overrightarrow{T} \oplus \overrightarrow{T} \overleftarrow{\mathbb{R}} \overrightarrow{\Sigma}, \diamondsuit :$   

$$\left[ F = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} \left[ Y_{SH} Y_{HS} \right]_{(i,j)}, B = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left[ Y_{AH} Y_{HA} \right]_{(i,j)} - \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left[ Y_{SH} Y_{HS} \right]_{(i,j)} - \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left[ Y_{AH} Y_{HA} \right]_{(i,j)} \right] \right]$$

$$X_{\delta} = \frac{M_{A}}{M_{T}} \operatorname{Re}(F) - \frac{M_{S}}{M_{T}} \operatorname{Re}(B) + \frac{M_{A} - M_{S}}{M_{T}} \operatorname{Re}(C) \cos \delta_{SA} + \operatorname{Im}(D) \sin \delta_{SA}$$

$$Y_{\delta} = -\frac{M_{A}}{M_{T}} \operatorname{Im}(F) + \frac{M_{S}}{M_{T}} \operatorname{Im}(B) - \frac{M_{A} - M_{S}}{M_{T}} \operatorname{Im}(C) \cos \delta_{SA} + \operatorname{Re}(D) \sin \delta_{SA}$$
(11)

式中: $X_s$ 、 $Y_s$ 分别为VSC-HVDC整流站并网节点H与 其余节点间电气距离和系统等值功角的组合,其值 不仅跟系统网络拓扑相关,而且随着等值功角的变 化而改变,会对 $P_u$ 产生持续变化的影响。式(10)可 表示为:

$$P_{H} = \operatorname{Re} \left( Y_{HH}^{-1} \right) X_{\delta} + \operatorname{Im} \left( Y_{HH}^{-1} \right) Y_{\delta} = \frac{G_{0} + g_{dc}}{(G_{0} + g_{dc})^{2} + (B_{0} + b_{dc})^{2}} X_{\delta} - \frac{B_{0} + b_{dc}}{(G_{0} + g_{dc})^{2} + (B_{0} + b_{dc})^{2}} Y_{\delta}$$
(12)

Re  $(Y_{HH}^{-1})$ 和 Im  $(Y_{HH}^{-1})$ 与 VSC-HVDC 整流站的等效 导纳相关,反映整流站的功率特性。则式(12)体现 了 VSC-HVDC 整流站影响  $P_{H}$ 的特性,为整流站的运 行对系统暂态稳定性的影响提供了量化分析方法。

# 3 VSC-HVDC 功率附加滑模控制策略设计

## 3.1 交直流互联系统数学模型

在研究VSC-HVDC功率附加控制以提高交直流 互联系统的暂态稳定性时,采用有功功率附加控 制,忽略VSC-HVDC的高阶动态特性,将VSC-HVDC 的有功功率附加控制模型近似为一阶惯性环节<sup>[15]</sup>, 如式(13)所示。

$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{T_{\mathrm{d}}} \left( P_{\mathrm{dcref}} - P_{\mathrm{dc}} + U \right) \tag{13}$$

式中: $P_{deref}$ 为 $P_{de}$ 参考值;U为直流有功功率附加量;  $T_d$ 为VSC-HVDC有功功率控制的等效时间常数。

综上,可建立式(14)所示分析有功附加量U与 反映系统暂态稳定性的等值功角关系的精确动态数 学模型,该模型为设计提高系统暂态稳定性的VSC-HVDC有功附加控制策略提供了理论基础。

$$\begin{aligned} \frac{dP_{dc}}{dt} &= \frac{1}{T_{d}} \left( P_{dcref} - P_{dc} + U \right) \\ \frac{d\delta_{SA}}{dt} &= \omega_{SA} \\ M_{SA} \frac{d\omega_{SA}}{dt} &= P_{m,SA} + \frac{G_{0} + g_{dc}}{\left(G_{0} + g_{dc}\right)^{2} + \left(B_{0} + b_{dc}\right)^{2}} X_{\delta} - (14) \\ \frac{B_{0} + b_{dc}}{\left(G_{0} + g_{dc}\right)^{2} + \left(B_{0} + b_{dc}\right)^{2}} Y_{\delta} - P_{c} - P_{max} \sin\left(\delta_{SA} - \gamma\right) \\ g_{dc} + jb_{dc} &= \frac{P_{dc}}{U_{H}^{2}} + j\frac{Q_{dc}}{U_{H}^{2}} \end{aligned}$$

式中:ws4为转子角速度。

3.2 基于非奇异Terminal 滑模控制的VSC-HVDC功 率附加控制策略

由动态数学模型式(14)可得,VSC-HVDC整流 站有功功率附加量U与反映系统暂态稳定性的等值 功角之间的关系是非线性的。针对二者之间的非线 性关系,本文提出采用非奇异Terminal滑模控制方 法来制定VSC-HVDC功率附加控制策略。

3.2.1 非奇异Terminal 滑模控制特征

滑模控制是一种非线性控制,具有参数少、设计 过程简单、鲁棒性强的特点,对强非线性系统具有良 好的适应性。非奇异 Terminal 滑模控制是在 Terminal 滑模控制基础上的完善,不仅使跟踪误差能在有 限时间内趋近0,还克服了奇异问题<sup>[16]</sup>。

非奇异Terminal滑模控制切换面函数:

$$S' = x_1 + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q}$$
(15)

190

由滑模控制理论可知,在滑模控制的作用下,可 以使得在任意状态下的 $x_1, x_2$ 趋近并到达切换面 $x_1 + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q} = 0$ ,然后沿着切换面快速运动到稳定点 $x_1 = 0$ 、  $x_2 = 0$ 。

3.2.2 非奇异Terminal 滑模控制提高暂态稳定性的 机理

VSC-HVDC有功功率附加控制的目的是提高系统暂态稳定性。考虑到交流系统故障前后,系统处于稳态时其等值功角可能发生变化,故采用等值功角变化速度及加速度作为状态变量建立切换面,如式(16)所示。

$$\begin{cases} x_{1} = \omega_{SA} \\ x_{2} = \dot{\omega}_{SA} = \frac{P_{m,SA}}{M_{SA}} + \frac{P_{H}}{M_{SA}} - \frac{P_{c} + P_{max} \sin(\delta_{SA} - \gamma)}{M_{SA}} \end{cases}$$
(16)

由式(16)可得,状态变量x<sub>2</sub>体现了系统等值机 械功率和电磁功率的差值,通过令x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub>趋近切换面 并沿切换面到达稳定点来提高系统暂态稳定性的 作用机理可以依据等面积法则来解释。系统功率 特性曲线示意图如附录A图A1所示。

1)系统等值功角正摆期间。

 $t_0$ 时刻发生故障,因等值电磁功率小于等值机 械功率而使同步机转子加速,导致 $x_2 > 0, x_1 > 0$ 。为 使 $x_1, x_2$ 趋于切换面,此时需要调节整流站的有功功 率,通过减小 $P_H$ 来减小 $x_2$ ,这会使系统等值机械功 率减小,即在图A1中的加速面积由 $D_1+D_2$ 减少到 $D_2$ 。 在 $t_1$ 时刻切除故障后,功角仍在正摆时,此时系统的 等值机械功率小于等值电磁功率,有 $x_2 < 0, x_1 > 0$ ,此 时仍需要减小 $P_H$ ,使 $x_2$ 进一步减小以趋近切换面, 在图A1中表示为减速面积由 $D_1$ 增加到 $D_2+D_4$ 。

2)系统等值功角反摆期间。

当功角反向摆动且系统的等值机械功率小于等 值电磁功率时,有 $x_2 < 0, x_1 < 0$ ,此时需要增大 $P_H$ ,使  $x_2$ 增大以趋近切换面,相当于减小反向摆动的加速 面积。当功角反向摆动且系统的等值机械功率大 于等值电磁功率时,有 $x_2 > 0, x_1 < 0$ ,此时仍需要增大  $P_H$ ,使 $x_2$ 进一步增大以趋近切换面,相当于增大反向 摆动的减速面积。

在减小加速面积和增大减速面积的过程中, $x_1$ 和 $x_2$ 会快速到达稳定点,系统等值功角也会加快趋于稳定。

3.2.3 VSC-HVDC有功附加控制策略

基于 VSC-HVDC 有功附加控制策略提高系统暂态稳定性,其关键是合理确定 VSC-HVDC 的有功功 率附加量 U,依据滑模控制理论,对切换面函数 S'求 导,如式(17)所示。

$$\dot{S}' = x_2 + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} x_2^{p/q-1} \dot{x}_2 \tag{17}$$

 $aaa(\mathbf{S}, \mathbf{a})aa$ 

由式(12)、(16)可得式(17)中状态变量 x<sub>2</sub>的导数为:

$$\dot{x}_{2} = \dot{g}_{de}N_{1} + N_{2} - \frac{Y_{max} \cos(\theta_{SA} - Y)\partial_{SA}}{M_{SA}}$$
(18)  
$$\begin{cases} N_{1} = \frac{(B_{0} + b_{de})^{2} - (G_{0} + g_{de})^{2}}{\left[(G_{0} + g_{de})^{2} + (B_{0} + b_{de})^{2}\right]^{2}} \frac{X_{\delta}}{M_{SA}} + \frac{2(G_{0} + g_{de})^{2} + (B_{0} + b_{de})^{2}}{\left[(G_{0} + g_{de})^{2} + (B_{0} + b_{de})^{2}\right]^{2}} \frac{Y_{\delta}}{M_{SA}} \\ N_{2} = \frac{G_{0} + g_{de}}{(G_{0} + g_{de})^{2} + (B_{0} + b_{de})^{2}} \frac{dX_{\delta}}{dt} \frac{1}{M_{SA}} - \frac{B_{0} + b_{de}}{(G_{0} + g_{de})^{2} + (B_{0} + b_{de})^{2}} \frac{dY_{\delta}}{dt} \frac{1}{M_{SA}} \end{cases}$$

在*x*<sub>1</sub>,*x*<sub>2</sub>趋近切换面的阶段,本文采用指数趋近 律,即令*S*'的导数为:

 $\dot{S}'=-\varepsilon \operatorname{sgn}(S')-kS' \varepsilon > 0, k > 0$  (20) 式中:sgn(•)为符号函数; $\varepsilon k$ 为参数。指数趋近律 不仅使设计的控制策略满足 Lyapunov 渐近稳定要 求,而且能够改善系统到达切换面的速度<sup>[16]</sup>。

最后,综合式(16)—(18)、(20)以及式(14)所示 的数学模型,可得*U*为:

$$U = P_{dc} - P_{dcref} - \frac{N_2 U_H^2 T_d}{N_1} + \frac{P_{max} \cos(\delta_{SA} - \gamma) \omega_{SA} U_H^2 T_d}{M_{SA} N_1} - \frac{q \beta U_H^2 T_d}{p N_1} x_2^{2^{-p/q}} - (\varepsilon \operatorname{sgn}(S') + kS') \frac{q \beta U_H^2 T}{p N_1} x_2^{1-p/q}$$
(21)

在保证趋近律的基础上,为减少计算量,可对形式如式(21)的表达式进行简化<sup>[17]</sup>,最终得到VSC-HVDC整流站有功功率附加量*U*的控制策略为:

$$U = P_{dc} - P_{deref} - \frac{N_2 U_H^2 T_d}{N_1} + \frac{P_{max} \cos(\delta_{SA} - \gamma) \omega_{SA} U_H^2 T_d}{M_{SA} N_1} - \frac{q \beta U_H^2 T_d}{p N_1} x_2^{2-p/q} - (\varepsilon \text{sgn}(S') + kS') \frac{U_H^2 T_d}{N_1}$$
(22)

本文设计的VSC-HVDC有功功率附加控制的原 理框图如图2所示。图中, $K_{p}$ 、 $K_{i}$ 为整流站PI外环控 制参数; $i_{max}$ 、 $i_{min}$ 分别为整流站内环电流的上、下限;  $i_{sd}$ 为电流参考值。

# 4 仿真分析

## 4.1 算例模型

为了验证所提控制策略的有效性,本文对附录 A图A2所示的3机交直流异步互联系统进行了仿 真分析。其中同步机SG<sub>1</sub>、SG<sub>2</sub>和SG<sub>3</sub>的额定容量 分别为450、192、128 MW;VSC-HVDC整流站接入母 线节点7,逆变站接入另一区域,额定传输功率为





300 MW,整流站采用定功率控制,逆变站采用定电 压控制。本文仿真中附加控制量的限幅为额定功率 的20%<sup>[18]</sup>。设置在母线6处发生三相短路,故障时 间为[1.2,1.6]s。式(22)中的相关参数都为经验参 数,根据文献[17,19],VSC-HVDC有功功率控制的 等效时间常数取 $T_d=0.11$ s;非奇异 Terminal 滑模控 制中的参数取为p=5、q=3、 $\beta=1$ 、 $\varepsilon=0.001$ 、k=10。 SG,和SG,属于领先群S,SG,属于余下群A。

#### 4.2 采用附加控制策略的暂态稳定性仿真

针对系统的暂态稳定性,采用本文的附加控制 策略与无附件控制进行了仿真对比分析。状态变量  $x_2$ 相对 $x_1$ 的变化轨迹如图3所示。当发生故障时, 系统由原来的稳定平衡点A'偏离到点B',导致 $x_1,x_2$ 不满足切换面 $x_1 + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q} = 0$ 的条件。与无控制策略 相比,在本文控制策略的作用下,通过不断调整 VSC-HVDC整流站的有功功率,会使轨迹加快收敛 到控制目标( $x_1 = 0, x_2 = 0$ ),即系统会快速回到稳定 平衡点A'。



图 3 x<sub>2</sub>相对x<sub>1</sub>的变化轨迹对比



图4为VSC-HVDC整流站的有功功率和有功功 率附加量随时间的变化曲线。由于VSC-HVDC整流 站容量的限制,有功附加量被限制在[-60,60] MW 范围内。因VSC-HVDC有功功率控制模型近似为一 阶惯性环节,图中整流站与电网交换的有功功率并 非立即响应有功附加量U的变化。

图 5 为在本文控制策略作用下系统等值机械功 率变化量 P<sub>H</sub>的增减情况。当功角正摆,即x<sub>1</sub>>0、x<sub>2</sub>>0



# 图4 VSC-HVDC整流站有功功率以及有功功率 附加量波形





## 图 5 本文控制策略下功角曲线及系统等值机械 功率改变量

Fig.5 Curves of power angle and system equivalent mechanical power change

和 $x_1 > 0_{x_2} < 0$ 时,  $P_H$ 是减小的; 当功角反摆, 即 $x_1 < 0_{x_2} < 0$ 和 $x_1 < 0_{x_2} > 0$ 时,  $P_H$ 是增大的。可见图 5 中 $P_H$ 增减情况与 3.2.2 节的理论分析相吻合。

图6为采用本文控制策略与无控制策略的系统 等值功角变化曲线对比图。可以看出,在无附加控 制策略下,系统的等值功角首摆幅度大,而且至少要 经过10s的波动才能趋于稳定。而本文控制策略不 仅减小了系统等值功角首摆的幅度,而且大幅减弱了 等值功角波动程度,在3.5s左右就平息了系统等值 功角的波动,有效地提高了系统恢复稳定的速度。



# 4.3 考虑信号获取延时的附加控制策略的适用性 验证

考虑通过广域量测系统获取信息会产生延时的 情况<sup>[14]</sup>,在获取控制策略所需信息时加入40 ms 和 90 ms的时间延迟,并进行仿真验证,仿真结果如图 192

7 所示。可以看出,在时滞的情况下本文控制策略 仍然能有效抑制系统等值功角的波动,能够提高系 统暂态稳定性。



图7 延时情况下系统等值功角曲线对比

Fig.7 Comparison of system equivalent power angle curves under time delay

以3机9节点系统算例仿真分析验证了所提 VSC-HVDC有功附加控制策略的有效性。实际上, 本文基于EEAC,通过互补群惯量中心变换将任意 多机电力系统等效为能反映系统暂态稳定的等值单 机无穷大系统,并在此基础上制定出VSC-HVDC功 率附加滑模控制方法,因此该方法适用于复杂多机 系统。

# 5 结论

1)通过理论推导因VSC-HVDC整流站影响产生 的系统等值机械功率变化量的表达式可知,在多机 交直流异步互联系统中,系统暂态稳定性不仅受到 VSC-HVDC整流站有功、无功功率的影响,还与整流 站和同步机的相对网络拓扑位置及系统等值功角等 因素有关。

2)建立了包含VSC-HVDC整流站功率特性与反 映系统暂态稳定性的等值功角的多机交直流异步互 联系统的数学模型,为设计提高系统暂态稳定性的 VSC-HVDC功率附加滑模控制方法提供了理论基础。

3)设计了基于指数趋近律的非奇异 Terminal 滑 模控制的 VSC-HVDC 整流站功率附加滑模控制方 法,通过合理改变加速或减速面积来加快系统趋近 稳定点,有效地提高多机交直流互联系统的暂态稳 定性。

4)当VSC-HVDC满负荷送电时,其功率附加控 制可以利用过负荷能力提高系统的暂态稳定性。然 而该过负荷能力受到VSC-HVDC造价和系统要求等 条件的限制,当故障情况过于严重时,换流器即使以 过负荷出力上限参与调制,对系统稳定的提升也是 有限的,系统可能会失去稳定。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

[1] 刘英培,谢乾,梁海平. 柔性直流输电系统自适应虚拟惯性调

频控制策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(5):129-136.

LIU Yingpei, XIE Qian, LIANG Haiping. Frequency regulation control strategy for flexible DC transmission system based on adaptive virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5):129-136.

- [2]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 Shiying, 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.
- [3]杨雪晶,杨强,束洪春,等.直流有功功率调制提高电网暂态稳定性研究[J].云南电力技术,2016,44(1):26-31,35.
   YANG Xuejing,YANG Qiang,SHU Hongchun, et al. Study on improving the transient stability of AC and DC hybrid power system by DC active power modulation[J]. Yunnan Electric Power,2016,44(1):26-31,35.
- [4] 徐泰山,丁茂生,彭慧敏,等.交直流电力系统暂态安全稳定在 线紧急控制策略并行算法[J].电力系统自动化,2015,39(10): 174-180.

XU Taishan, DING Maosheng, PENG Huimin, et al. A parallel algorithm for determining an online emergency control strategy of transient security and stability for AC-DC power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10):174-180.

[5] 陈启超,李晖,吴文传,等. 基于 VSC-HVDC 异步互联系统联网 转孤岛运行稳定控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(4): 32-39.

CHEN Qichao, LI Hui, WU Wenchuan, et al. Stability control strategy for conversion from grid-tied to island operation of asynchronous interconnected power grids based on VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 32-39.

- [6] MACHOWSKI J, KACEJKO P, NOGAL Ł, et al. Power system stability enhancement by WAMS-based supplementary control of multi-terminal HVDC networks[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(5):583-592.
- [7] 邹延生,董萍.基于协同控制理论的非线性直流附加控制器设计[J].电力自动化设备,2017,37(4):210-217.
   ZOU Yansheng, DONG Ping. Design of nonlinear HVDC supplementary controller based on synergetic control[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(4):210-217.
- [8] ERIKSSON R. Coordinated control of multiterminal DC grid power injections for improved rotor-angle stability based on Lyapunov theory[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014,29(4):1789-1797.
- [9] ERIKSSON R. On the centralized nonlinear control of HVDC systems using Lyapunov theory[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):1156-1163.
- [10] 刘子文, 苗世洪, 李力行, 等. 基于多状态 Markov 模型和逆最 优理论的HVDC附加控制器[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 114-120, 128.
  LIU Ziwen, MIAO Shihong, LI Lixing, et al. Complementary controller of HVDC based on multi-state Markov model and inverse optimal theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 114-120, 128.
- [11] 黄振琳,管霖,涂亮,等. 基于 Bang-Bang 控制的直流大信号暂态稳定控制器研制[J]. 高电压技术,2016,42(1):127-135.
   HUANG Zhenlin,GUAN Lin,TU Liang, et al. Study on a large-signal transient stability controller for HVDC based on Bang-Bang control[J]. High Voltage Engineering,2016,42(1):127-135.
- [12] 薛文. 基于混沌粒子群算法的直流调制控制器参数优化研究 [D]. 兰州:兰州交通大学,2018.

XUE Wen. Research on parameter optimization of DC modulator based on cooperative chaotic particle swarm optimization [D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University, 2018.

 [13] 薛禹胜. 非自治非线性多刚体系统运动稳定性的定量分析:兼 论电力系统暂态稳定性(续前)[J]. 电力系统自动化,1998,22
 (2):1-5.

XUE Yusheng. Analysis of transient stability of power system including large scale wind power based on the extended equal area rule[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998,22(2):1-5.

[14] 林俐,杨以涵.基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(12): 105-110,115.

LIN Li, YANG Yihan. Analysis of transient stability of power system including large scale wind power based on the extended equal area rule[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12):105-110,115.

[15] 郝建红,米昕禾,汪筱巍.交直流联合输电系统中HVDC的自 适应全局快速 Terminal 滑模控制[J].电工技术学报,2017,32 (11):8-16.

HAO Jianhong, MI Xinhe, WANG Xiaowei. Adaptive global fast terminal sliding mode control for HVDC in AC-DC parallel transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11):8-16.

- [16] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真:基本理论与设计方法 [M].4版.北京:清华大学出版社,2019:379-381.
- [17] 张巍巍,王京. 基于指数趋近律的非奇异 Terminal 滑模控制

[J]. 控制与决策,2012,27(6):909-913.

ZHANG Weiwei, WANG Jing. Nonsingular Terminal sliding model control based on exponential reaching law[J]. Control and Decision, 2012, 27(6):909-913.

- [18] 张帆."风火打捆"直流外送系统暂态稳定性研究[D].北京: 华北电力大学,2019.
   ZHANG Fan. Study on transient stability for wind-thermalbundled power transmitted by DC system[D]. Beijing; North
- China Electric Power University, 2019.
  [19] 李宁璨,徐政,唐庚,等.基于滑模鲁棒控制器的有功功率调制 在多端直流输电的应用[J].中国电机工程学报, 2016, 36(3): 664-673.

LI Ningcan, XU Zheng, TANG Geng, et al. Sliding mode robust control based active-power modulation in multi-terminal HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 664-673.

### 作者简介:



姜惠兰(1965—),女,天津人,副教授, 博士,主要研究方向为新能源电力系统分析 与控制、智能系统及其在电力系统中的应用 (E-mail:hljiang@tju.edu.cn);

 李 政(1996—),男,河南商丘人,硕 士研究生,主要研究方向为新能源电力系统
 分析与控制(E-mail:li\_zheng@tju.edu.cn)。
 (编辑 王欣竹)

姜惠兰

# Sliding mode control method of VSC-HVDC additional power for improving transient stability

# JIANG Huilan, LI Zheng, XIAO Rui, LI Xiyu

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Improving the transient stability of AC systems by using the features of fast and controllable DC power has become an important research direction for AC / DC systems. Taking the multi-machine AC / DC system as the research object, a VSC-HVDC (Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current) active power control method to improve transient stability is proposed. With the help of VSC-HVDC ground admittance model and contraction of node admittance matrix, the expression of the system equivalent mechanical power variation including power characteristics of the rectifier station and topology information is derived, a mathematical model is established for the analysis of additional active power of rectifier station and equivalent power angle of system transient stability. For the nonlinear relationship between the rectifier station and the system, non-singular terminal sliding mode control is adopted. By established mathematical model, the control strategy for additional active power of rectifier station that can speed up system's approach to stability is determined. The effectiveness of the proposed control method is simulated and analyzed, the results show that using the proposed method can improve the change of equivalent power angle and accelerate the stability recovery speed of the system.

Key words: VSC-HVDC; multi-machine AC / DC system; transient stability; node admittance matrix; sliding mode control





# 图 A1 系统功率特性曲线示意图



Fig.A1 Schematic diagram of system power characteristic curve

图 A2 交直流异步互联系统

Fig.A2 AC-DC asynchronous interconnection system