

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210127

交直流混联系统非线性自适应广域附加控制器的设计

张志杰¹, 姚伟¹, 严才¹, 高磊², 文劲宇¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074;
2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 为了提高交直流混联系统的暂态稳定性, 设计了基于高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)大信号调制方式的非线性自适应广域附加控制器(Nonlinear Adaptive Wide-area Supplementary Controller, NAWSC)。该控制器利用扰动观测器估计和补偿实际系统中的非线性动态, 无需精确模型, 解决了模型不确定时稳定控制措施不易设计的难题。同时, 该控制器通过整合广域功角信息得到的系统等值功角进行输出反馈, 直接实现暂态稳定控制。在四机两区域交直流混联系统和10机39节点交直流混联系统中进行仿真。结果表明: 在不同运行工况下, NAWSC相对于比例积分型广域附加控制器具有更好适应性; 在参数不确定下, NAWSC相对于基于精确模型的反馈线性化广域附加控制器具有更好的控制鲁棒性。所设计NAWSC可以提高HVDC暂态调节能力。

关键词: 交直流混联; 暂态稳定性; 扰动观测器; 广域控制; 自适应

Design of a nonlinear adaptive wide-area supplementary controller for an AC/DC hybrid power system

ZHANG Zhijie¹, YAO Wei¹, YAN Cai¹, GAO Lei², WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: To improve the transient stability of an AC/DC hybrid grid, this paper designs a Nonlinear Adaptive Wide-Area Supplementary Controller (NAWSC) based on the large signal modulation of High Voltage Direct Current (HVDC). Without an accurate model, the proposed controller can directly estimate and compensate for the nonlinear dynamics in the actual system using a disturbance observer. It can also tackle the problem that it is difficult to design corresponding control measures when the model is uncertain. Equivalent wide-area power angle information is used for output feedback to realize transient stability control directly. Two case studies are undertaken based on a four-machine two-area AC/DC hybrid grid and a 10-machine 39-bus AC/DC hybrid system. The simulation results show that compared with a proportional integration wide-area supplementary controller, NAWSC possesses better adaptability under different operating conditions. When the uncertainty of parameters is taken into account, NAWSC possesses better control robustness compared with a feedback linearized wide-area supplementary controller. Based on the accurate model, NAWSC can improve the transient regulation capability of HVDC.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Technical Research of Grid-Source Coordination Performance Assessment and Optimization based on Generator Performance Differentiation and Power Grid Dominated Stability" (No. SGZJ0000KXJS1800293 and No. 521104180019).

Key words: AC/DC hybrid grid; transient stability; disturbance observer; wide-area control; adaptation

0 引言

随着 HVDC 技术的快速发展, 我国已明显形成

了交直流混联电网^[1-3]。然而交直流系统间存在着非常复杂的相互作用, 故障对交直流混联电网的影响已由局部转变为全局。因此, 亟需深入研究提升交直流混联电网暂态稳定性的控制措施^[4-7]。与切机切负荷等常规暂稳控制措施相比, 直流控制具有速度快、经济性好等优点^[8], 基于大信号调制方式的直流附加功率控制可有效改善系统暂态稳定性^[9]。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“基于发电机性能差异化及电网主导稳定的网源协调性能评估和优化技术研究”(SGZJ0000KXJS1800293, 521104180019)

目前线性控制理论已被广泛用于设计直流附加功率控制。文献[10]将单机无穷大系统的运动方程在运行点附近直接线性化,并应用经典线性控制理论设计直流功率附加控制器。文献[11]将线性二次最优控制方法应用到多直流系统的直流附加控制中。比例积分(Proportional Integration, PI)/比例微积分(Proportional Integration Differentiation, PID)是经典的线性化方法。通过对反馈信号进行比例放大、微分、滤波等处理后控制直流传输功率变化,控制器结构简单,整定参数较少。文献[12]在四机系统中设计了PID功率调制器,文献[13]设计了适用于背靠背柔性直流输电系统的双环PI型附加控制,用于改善交流系统频率响应特性。利用上述控制方法所设计的控制器只有在稳态运行点附近整定得到合理的控制参数才能起到理想的控制效果。然而实际电网网架结构及运行方式多变,基于线性控制方法设计的附加控制器具有较差的适应性。

为此,非线性控制理论被引入到附加控制器设计中。变结构理论^[14]、反馈线性化控制(Feedback Linearizing Control, FLC)、自适应控制理论^[15-16]、鲁棒控制理论^[17]等在全类非线性附加控制器中被广泛应用。然而采用非线性控制理论设计附加控制器时存在准确建模的困难,其控制率计算较为复杂,同时也无法保证在网架结构、运行方式等不同工况下的控制性能。近年来,非线性自抗扰控制技术由于其不依赖系统数学模型,能利用扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)进行扰动估计与补偿,对系统扰动具有较高鲁棒性的特点,被广泛应用于电力系统控制器设计中^[18-20]。文献[18]提出了一种自抗扰附加阻尼控制方法解决风火打捆系统次同步振荡的问题。文献[19]针对光储微电网运行中负荷投切等引起的电压异常问题,提出了一种基于自抗扰控制技术的无功支撑控制策略。然而,文献[20]基于自抗扰控制技术通过ESO进行观测时,存在滞后的问题,无法及时观测出扰动并进行补偿,还需进一步对自抗扰控制进行完善。另一方面,文献[16]应用非线性自适应控制(Nonlinear Adaptive Control, NAC)解决了多机电力系统稳定控制问题。文献[21]将非线性自适应控制应用于风电场网侧换流器控制中提升了风电场的低电压穿越能力。

因此,综合考虑交直流混联系统频繁变化的运行工况以及系统建模过程中可能存在参数不确定和测量误差的问题,本文设计了一种基于HVDC大信号调制方式的非线性自适应广域附加控制器。该控制器无需精确模型和全部状态反馈,能直接利用扰动观测器估计和补偿实际系统中的非线性动态,保

证系统大扰动下的暂态稳定。在四机两区域交直流混联系统和10机39节点交直流混联系统中进行仿真,结果表明:NAWSC具有良好的适应性和鲁棒性,更符合实际工程要求^[22]。

1 非线性自适应控制的基本原理

采用非线性自适应控制设计控制器主要包含:输入输出线性化、扰动观测器设计和基于极点配置的线性化控制设计三个部分^[22]。

1.1 输入输出线性化

非线性系统描述为式(1)。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} \in R^n$ 为状态向量; $\mathbf{u} \in R^m$ 为控制输入向量; $\mathbf{y} \in R^m$ 为系统输出向量; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为平滑的函数向量。

通过将系统输出 $y_i(i=1, \dots, m)$ 对时间 t 进行高阶微分,直到出现任意的控制输入 $u_j(j=1, \dots, m)$ 为止,可得非线性系统的输入输出线性化方程为

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ y_2^{(r_2)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} \cdot h_1 \\ L_f^{r_2} \cdot h_2 \\ \vdots \\ L_f^{r_m} \cdot h_m \end{bmatrix} + \mathbf{B}(\mathbf{x}) \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $r_i(i=1, \dots, m)$ 为微分阶数; $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ 为控制增益矩阵。假设 $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ 可逆,则可以引入新的控制输入向量 $\mathbf{v} \in R^m$,其与原控制输入向量 $\mathbf{u} \in R^m$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}) \cdot \left\{ - \begin{bmatrix} L_f^{r_1} \cdot h_1 \\ L_f^{r_2} \cdot h_2 \\ \vdots \\ L_f^{r_m} \cdot h_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

进行变量替换得到新的输入输出关系为

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ y_2^{(r_2)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2 扰动观测器设计

非线性控制理论中FLC能够计及系统中的耦合非线性关系,但是对建模精确度要求高,控制率计算较为复杂。与FLC不同,NAC则通过引入高增益扰动观测器来估计耦合非线性和外部扰动,大大简化了控制率计算。

假设在输入输出线性化方程(2)中存在耦合非线性关系,通过设计扰动向量可对其进行估计,定

义扰动向量为

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \vdots \\ \Psi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f^1 \cdot h_1 \\ L_f^2 \cdot h_2 \\ \vdots \\ L_f^m \cdot h_m \end{bmatrix} + [\mathbf{B}(\mathbf{x}) - \mathbf{B}_0] \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\Psi_i (i=1, \dots, m)$ 为扰动项; \mathbf{B}_0 为标称的控制增益矩阵。于是, 式(2)中的输入输出线性化系统可重新表示为标称控制与扰动项之和的形式。

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ y_2^{(r_2)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \vdots \\ \Psi_m \end{bmatrix} + \mathbf{B}_0 \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于第 i 个子系统, 即式(6)中的第 i 行, 通过定义 r_i 个状态变量 $z_{i,1} = y_i, z_{i,2} = y_i^{(1)}, \dots, z_{i,r_i} = y_i^{(r_i-1)}$ 和一个虚拟状态变量 z_{i,r_i+1} 表示扰动项 $z_{i,r_i+1} = \Psi_i$, 第 i 个子系统可表示为式(7)所示的标准形式。

$$\begin{cases} \dot{z}_{i,1} = z_{i,2} \\ \dot{z}_{i,2} = z_{i,3} \\ \vdots \\ \dot{z}_{i,r_i} = z_{i,r_i+1} + \mathbf{B}_{0i} \cdot \mathbf{u} \\ \dot{z}_{i,r_i+1} = \dot{\Psi}_i \end{cases} \quad (7)$$

式中, \mathbf{B}_{0i} 为 \mathbf{B}_0 的第 i 行。对于新的标准子系统(7), 许多不同类型的扰动观测器可用于估计扰动项 Ψ_i , 本文高增益观测器据此进行设计。

假设子系统(7)仅有第一个状态变量可测, 即系统输出 $y_i = z_{i,1}$, 则可设计 r_i+1 阶的高增益扰动观测器估计第 i 个子系统的其余状态变量和系统扰动项, 扰动观测器方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_{i,1} = \hat{z}_{i,2} + l_{i,1} \cdot (z_{i,1} - \hat{z}_{i,1}) \\ \dot{\hat{z}}_{i,2} = \hat{z}_{i,3} + l_{i,2} \cdot (z_{i,1} - \hat{z}_{i,1}) \\ \vdots \\ \dot{\hat{z}}_{i,r_i} = \hat{z}_{i,r_i+1} + l_{i,r_i} \cdot (z_{i,1} - \hat{z}_{i,1}) + \mathbf{B}_{0i} \cdot \mathbf{u} \\ \dot{\hat{z}}_{i,r_i+1} = l_{i,r_i+1} \cdot (z_{i,1} - \hat{z}_{i,1}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\hat{z}_{i,j}$ 为 $z_{i,j}$ 的估计值; $l_{i,j} (j=1, \dots, r_i+1)$ 为高增益扰动观测器的增益, 按照极点配置方法整定, 保证式(9)特征值在左半平面期望的合适位置即可。

$$s^{r_i+1} + l_{i,1} \cdot s^{r_i} + \dots + l_{i,r_i} \cdot s + l_{i,r_i+1} = 0 \quad (9)$$

最后, 利用扰动项的估计值 $\hat{\Psi}_i = \hat{z}_{i,r_i+1}$ 来补偿实际系统中的扰动 Ψ_i , 便可得到新的控制输入 $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^m$, 其与原控制输入 $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 的关系为

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}_0^{-1} \cdot \left\{ - \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_1 \\ \hat{\Psi}_2 \\ \vdots \\ \hat{\Psi}_m \end{bmatrix} + \mathbf{v} \right\} \quad (10)$$

通过合理设置控制输入 $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^m$, 由式(4)即可实现输出跟踪。

1.3 基于极点配置的线性控制设计

基于式(4)所示新的输入输出关系, 设计一种解耦的线性控制规律, 如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{1\text{ref}}^{(r_1)} \\ y_{2\text{ref}}^{(r_2)} \\ \vdots \\ y_{m\text{ref}}^{(r_m)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{1,r_1} \cdot e_1^{(r_1-1)} + \dots + k_{1,1} \cdot e_1 \\ k_{2,r_2} \cdot e_2^{(r_2-1)} + \dots + k_{2,1} \cdot e_2 \\ \vdots \\ k_{m,r_m} \cdot e_m^{(r_m-1)} + \dots + k_{m,1} \cdot e_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $k_{i,r_i} (i=1, \dots, m)$ 为线性控制器的增益; $y_{i\text{ref}}$ 为各期望输出的参考值, $e_i = y_{i\text{ref}} - y_i$ 为轨迹误差, $i=1, \dots, m$ 。系统误差动态由式(12)表示。

$$\begin{cases} e_1^{(r_1)} + k_{1,r_1} \cdot e_1^{(r_1-1)} + \dots + k_{1,1} \cdot e_1 = 0 \\ e_2^{(r_2)} + k_{2,r_2} \cdot e_2^{(r_2-1)} + \dots + k_{2,1} \cdot e_2 = 0 \\ \vdots \\ e_m^{(r_m)} + k_{m,r_m} \cdot e_m^{(r_m-1)} + \dots + k_{m,1} \cdot e_m = 0 \end{cases} \quad (12)$$

因此, 通过合理设计线性控制方法的参数 k_{i,r_i} , $i=1, \dots, m$, 便能得到期望的系统动态响应, 完成 NAC 附加控制器设计。

2 非线性自适应直流广域附加控制器设计

2.1 控制系统的数学模型

HVDC 的 NAWSC 模型如图 1 所示, NAWSC 是附加到整流侧的定电流控制中。

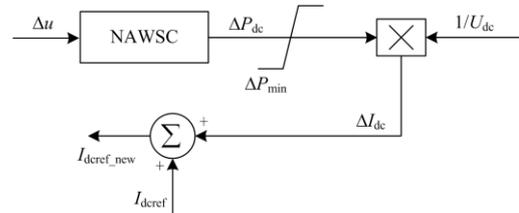


图 1 HVDC 的 NAWSC 模型

Fig. 1 NAWSC model of HVDC

以四机两区交直流混联系统为研究对象, 模型如图 2 所示。该模型是在 IEEE 四机两区电力系统基础上将交流线路 3-9 改造为 HVDC 形成的交直流混联系统, 其中 HVDC 整流侧和逆变侧换流器分别计作 B5 和 B11。

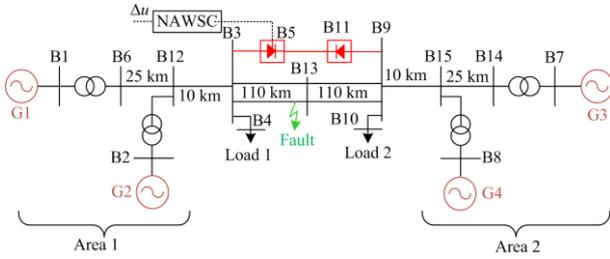


图2 四机两区交直流混联系统

Fig. 2 Four-machine two-area AC/DC hybrid system

下面构建用于稳定分析的四机两区交直流混联系统动态系统模型, 忽略发电机阻尼系数, 得到各发电机转子运动方程为^[23]

$$\dot{\delta}_p = \omega_p - 1 \quad (13)$$

$$\dot{\omega}_p = \omega_0 (P_{mp} - P_{ep}) / M_p, \quad p=1,2,3,4 \quad (14)$$

式中: ω_0 为额定转速; δ_p 和 ω_p 分别为发电机转子角和转速; M_p 为发电机转动惯量; P_{mp} 和 P_{ep} 分别为发电机输入机械功率和输出电磁功率。

根据 EEAC 理论, 多机系统受到扰动后, 所有发电机组可以分为临界机群(S 群)和余下机群(A 群), 在暂态过程中, S 群相对 A 群正向发散^[24]。四机两区系统故障分群模式清晰, 系统受扰后 G1 和 G2 构成的区域 1 机组为临界机组, G3 和 G4 构成的区域 2 机组为余下机组。严重故障扰动下区域 1 的 G1 和 G2 机组功角首先正向发散导致系统失稳。根据机组分群得到两机系统运动方程, 最终将两机系统进一步等值为一个时变的单机系统^[25-26]。

$$\dot{\delta}_{sa} = \omega_{sa} \quad (15)$$

$$\dot{\omega}_{sa} = \omega_0 (P_{msa} - P_{esa}) / M_{sa} \quad (16)$$

式中: M_{sa} , δ_{sa} , ω_{sa} , P_{msa} 和 P_{esa} 分别为单机等值系统的等值惯性时间常数、转子角、转子转速、机械功率和电磁功率, 具体过程详见文献[2]。

结合四机两区系统拓扑, 忽略网络损耗推导单机等值电磁功率表达式为

$$P_{esa} = P_{dc} + 2P_{ac3-13} + \frac{M_a P_{L1} - M_s P_{L2}}{M_s + M_a} \quad (17)$$

式中: P_{dc} 为正常运行工况下的直流功率; P_{ac3-13} 为正常运行工况下母线 3 与母线 13 之间的交流传输功率; P_{L1} 与 P_{L2} 分别为母线 3 与母线 10 所接负荷功率; $M_s = M_1 + M_2$; $M_a = M_3 + M_4$ 。直流功率调节过程用一惯性环节等效^[27]。即

$$\dot{P}_{dc} = (P_{dcref} - P_{dc} + u_{dc}) / T_{dc} \quad (18)$$

式中: P_{dcref} 为正常运行工况下的直流功率给定值; T_{dc} 为直流调制时间常数; u_{dc} 为直流调制量, 亦即附加控制器的输出。

运用 EEAC 理论将四机系统进行单机等值后得到的等值转子角 δ_{sa} 表征了系统稳定程度, NAWSC 的目的是进一步提升整个交直流系统的稳定性, 因此直接将等值转子角 δ_{sa} 作为被控系统的输出对象, 即得到系统输出方程为

$$y(t) = \delta_{sa} - \delta_{sa0} \quad (19)$$

式中, δ_{sa0} 为正常运行时单机等值转子角初始值。

至此, 式(15)一式(19)构成了控制系统的数学模型。

2.2 广域附加控制设计

首先将控制系统的数学模型进行输入输出线性化, 求系统的关系度, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = \dot{\delta}_{sa} = \omega_{sa} \\ \ddot{y}(t) = \dot{\omega}_{sa} \\ y^{(3)}(t) = \ddot{\omega}_{sa} \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)中第三式整理重写为式(21)。

$$\begin{aligned} y^{(3)}(t) = & -2\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \frac{\omega_0}{M_a}\right)\dot{P}_{ac3-13} - \frac{1}{T_{dc}}\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \right. \\ & \left. \frac{\omega_0}{M_a}\right)(P_{dcref} - P_{dc}) - \frac{1}{T_{dc}}\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \frac{\omega_0}{M_a}\right)u_{dc} = \end{aligned} \quad (21)$$

$$F(\mathbf{x}) + B(\mathbf{x}) \cdot u_{dc}$$

其中,

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}) = & -2\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \frac{\omega_0}{M_a}\right)\dot{P}_{ac3-13} - \\ & \frac{1}{T_{dc}}\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \frac{\omega_0}{M_a}\right)(P_{dcref} - P_{dc}) \\ B(\mathbf{x}) = & -\frac{1}{T_{dc}}\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \frac{\omega_0}{M_a}\right) \end{aligned}$$

因此, 系统的关系度为 3, 等于系统阶数, 可以通过适当坐标映射转化为新坐标系表达的线性化标准型。先通过坐标变换定义 3 个新的状态变量:

$$\begin{cases} z_1 = y = \delta_{sa} - \delta_{sa0} \\ z_2 = \dot{y} = \omega_{sa} \\ z_3 = \ddot{y} = \dot{\omega}_{sa} \end{cases} \quad (22)$$

基于式(21)定义扰动项为

$$\Psi = F(\mathbf{x}) + [B(\mathbf{x}) - B_0] \cdot u_{dc} \quad (23)$$

式中, B_0 为标称参数对应的标称控制增益。用虚拟状态变量 z_4 表示扰动项 Ψ 后, 得到线性化标准型:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = z_4 + B_0 \cdot u_{dc} \\ \dot{z}_4 = \dot{\Psi} \end{cases} \quad (24)$$

式(24)所示的系统可以用多种类型的扰动及状态观测器来计算扰动项及状态变量的估计值, 本文采用的是高增益观测器, 观测器阶数为4阶, 具体如式(25)所示。利用新的控制输入与原输入关系式

得到最终的输出反馈控制率如式(26)所示。最终NAWSC的控制结构如图3所示, 由状态及扰动观测器、线性控制和扰动补偿组成, NAWSC只需要测量机组转角信号以计算单机等值转子角。

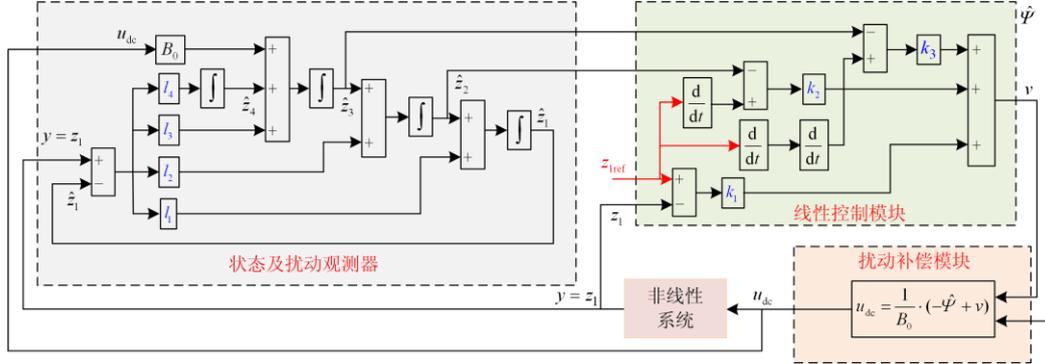


图3 NAWSC的控制结构图

Fig. 3 Control structure of NAWSC

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 + l_1(z_1 - \hat{z}_1) \\ \dot{\hat{z}}_2 = \hat{z}_3 + l_2(z_1 - \hat{z}_1) \\ \dot{\hat{z}}_3 = \hat{z}_4 + l_3(z_1 - \hat{z}_1) + B_0 \cdot u_{dc} \\ \dot{\hat{z}}_4 = \dot{\hat{\psi}} = l_4(z_1 - \hat{z}_1) \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{1}{B_0} \cdot (-\dot{\hat{\psi}} + v) \\ v = z_{1ref}^{(3)} + k_3 \cdot (\dot{z}_{1ref} - \hat{z}_3) + \\ k_2 \cdot (\dot{z}_{1ref} - \hat{z}_2) + \\ k_1 \cdot (z_{1ref} - z_1) \end{cases} \quad (26)$$

综上, 所提方法的具体实现流程如图4所示。

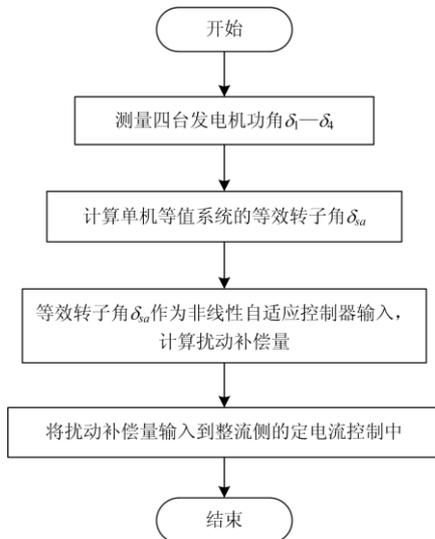


图4 所提方法的具体实现流程图

Fig. 4 Flow chart of the proposed method

3 算例分析 1

3.1 算例系统

基于图2所示四机两区交直流混联系统, 对HVDC设计了NAWSC, 本小节首先测试NAWSC的性能。此外, 还基于经典控制理论设计了基于HVDC的PI型广域附加控制器(PI Wide-area Supplementary Controller, PIWSC)以及基于非线性理论设计了精确模型的反馈线性化广域附加控制器(Feedback Linearization Wide-area Supplementary Controller, FLWSC), 对比各类控制器的控制性能。

HVDC的PIWSC模型如图5所示, 功率调节指令由PI环节产生后附加到整流侧定电流控制中。

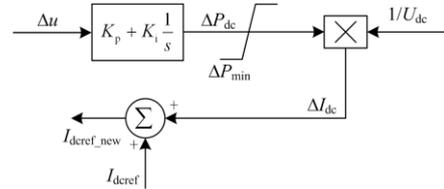


图5 HVDC的PIWSC模型

Fig. 5 PIWSC model of HVDC

基于精确模型的FLWSC是在式(21)所示的基础上推导新的控制输入与原输入的关系, 如式(27)所示。

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{1}{B(x)} \cdot (-F(x) + v) \\ F(x) = -2\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \frac{\omega_0}{M_a}\right)\dot{P}_{ac3-13} - \frac{1}{T_{dc}}\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \frac{\omega_0}{M_a}\right)(P_{dcref} - P_{dc}) \\ B(x) = -\frac{1}{T_{dc}}\left(\frac{\omega_0}{M_s} + \frac{\omega_0}{M_a}\right) \end{cases} \quad (27)$$

新的控制输入通过基于极点配置的线性控制方法设计反馈控制率，如式(28)所示。

$$v = z_{1ref}^{(3)} + k_3 \cdot (\dot{z}_{1ref} - z_3) + k_2 \cdot (\dot{z}_{1ref} - z_2) + k_1 \cdot (z_{1ref} - z_1) \quad (28)$$

从而利用 HVDC 实现反馈线性化控制，然而 FLWSC 的反馈控制率需要测量系统所有状态变量。

PIWSC 的参数为： $k_p=8, k_i=30$ 。先整定 FLWSC 线性控制的三个极点为左半平面的-10 处，根据极点配置原理确定 FLWSC 的反馈增益： $k_{f1}=1\ 000, k_{f2}=300, k_{f3}=30$ 。取 NAWSC 线性控制的反馈增益： $k_{n1}=1\ 000, k_{n2}=300, k_{n3}=30$ ，以保证与 FLWSC 的线性控制具有相同的极点；NAWSC 的状态及扰动观测器的极点配置为左半平面的-100 处，从而确定观测器增益为： $l_1=4 \times 10^2, l_2=6 \times 10^4, l_3=4 \times 10^6, l_4=1 \times 10^8$ 。

3.2 对暂态稳定性的提升效果

在四机两区交直流混联系统中，定义几种运行方式和故障，如表 1 所示。

表 1 不同运行方式及其故障信息

Table 1 Fault information of different operation modes

运行方式	直流联络线 P_{dc}/MW	交流联络线 P_{ac}/MW	故障地点
1	200	178.3×2	3-13 靠近母线 13 处
2	200	178.3×2	9-13 靠近母线 9 处
3	300	131.9×2	9-13 靠近母线 9 处

首先在运行方式 1 下设置故障扰动：区域交流联络线 3-13 靠近母线 13 处 0.5 s 时发生三相接地短路故障，0.6 s 时切除该线路，1.1 s 时线路重合闸成功。在该故障下，单机等值功角 δ_{sa} 的响应曲线如图 6(a)所示，对应的直流调制量如图 6(b)所示。

由图 6(a)可看出，无附加控制时系统受扰后约 8 s 左右达到新的稳态运行点，系统暂态响应过程较长，单机等值功角首摆最大到达 37° 后回摆。传统 PIWSC 加入后，单机等值功角首摆最大值可明显减小至 30° 以内，可见 HVDC 的功率调制有助于增加系统暂态过程中的减速功率，系统能够更快平息振荡达到新的运行点。此外，PIWSC 加入后，系统回摆时振幅有所增加，对回摆稳定性有些许恶化作用。而在加入 NAWSC 以后，相同故障下系统等值功角振荡幅值无论是首摆还是回摆过程中都相比加 PIWSC 时明显更小，首摆最大值进一步减小至 20° 左右，回摆时振幅也小于 5°。综上，相比 PIWSC，NAWSC 取得了更佳动态响应，整个暂态稳定性进一步提升且不会影响系统回摆。

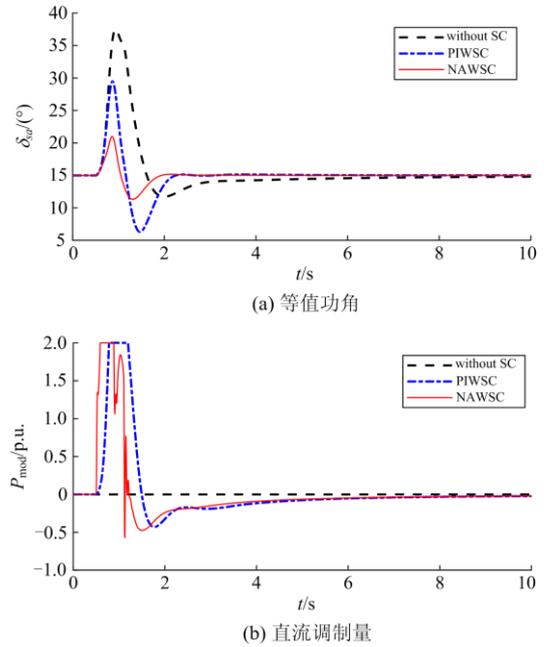


图 6 不同 HVDC 广域附加控制下的等值功角与直流调制量
Fig. 6 Equivalent power angle and DC modulation under different HVDC wide-area additional control

进一步地，在该故障下，单机等值功角及对应的直流调制量在 FLWSC 和 NAWSC 控制下的系统响应曲线如图 7 所示。由图 7(b)可看出，相比 FLWSC，NAWSC 在故障发生到故障切除时间段内可以输出更大的直流功率调制量，增加更多减速功

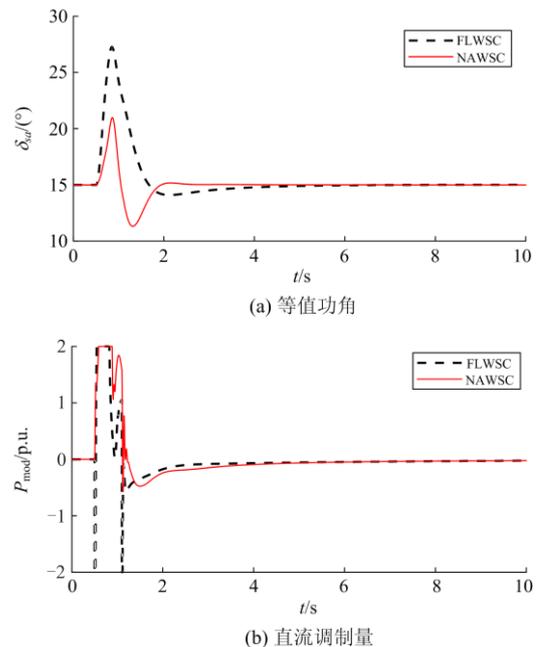


图 7 不同非线性广域附加控制下的等值功角与直流调制量
Fig. 7 Equivalent power angle and DC modulation under different nonlinear wide-area additional control

率, 有利于提升系统首摆的稳定性, 从图 7(a)可看出, NAWSC 具有更小首摆幅值。

必须指出, 实际 Matlab/Simulink 中搭建的四机两区系统仿真模型包含调速器、励磁系统及 PSS 等动态过程, 要比设计反馈线性化控制率时所使用的简化模型复杂得多。而反馈线性化控制率计算无法计及全部系统非线性动态, 难以避免设计误差, 很大程度上恶化了 FLWSC 控制效果。但 NAWSC 不需要精确模型, 利用扰动项估计值对实际扰动和非线性项进行综合性补偿, 降低系统建模精确性要求的同时能够获得良好的控制效果。相比 FLWSC, NAWSC 显然具有更佳的控制效果。

图 8 给出了 FLWSC 根据式(28)计算的扰动项计算值和 NAWSC 中扰动观测器的扰动项估计值。从图 8 可看出, NAWSC 中高增益扰动观测器正确有效性工作, 在系统发生拓扑状态突变的不连续点处, 扰动项计算值和估计值存在误差。

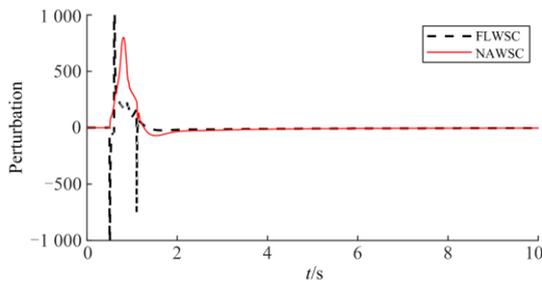
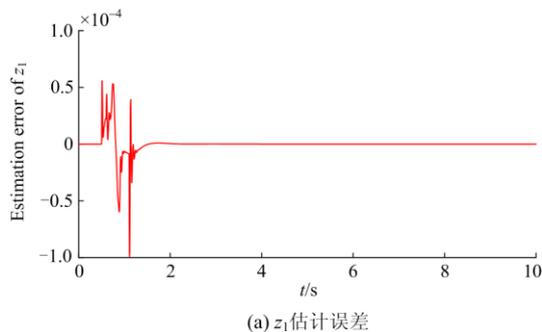


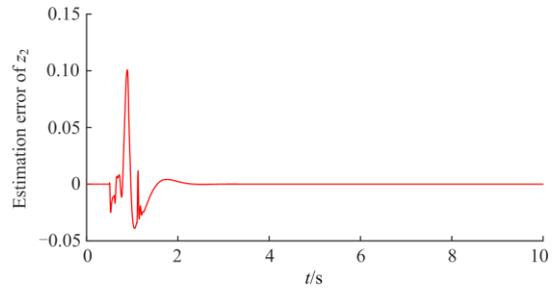
图 8 扰动项计算值与估计值对比

Fig. 8 Comparison between calculated value and estimated value of the perturbed term

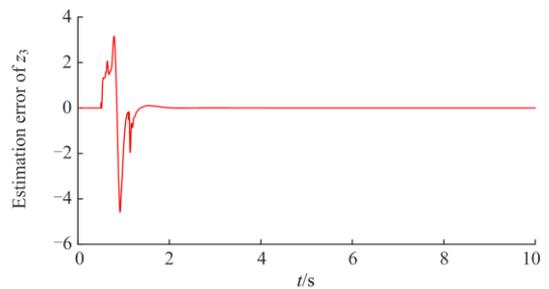
最后, 给出 NAWSC 状态估计误差如图 9 所示。由图 9 可知, 当系统故障发生(0.5 s), 故障切除(0.6 s)以及重合闸(1.1 s)时, 系统状态突变会引起强非线性动态, 观测器的状态观测误差都会突变到一个很大的值。高增益扰动观测器不能很好估计系统发生突变时刻的准确状态, 即便如此, 在突变时刻后很短时间内观测器能迅速恢复估计精度, 保证基于状态估计设计的线性反馈控制率的有效性。



(a) z_1 估计误差



(b) z_2 估计误差



(c) z_3 估计误差

图 9 观测器对不同状态的估计误差

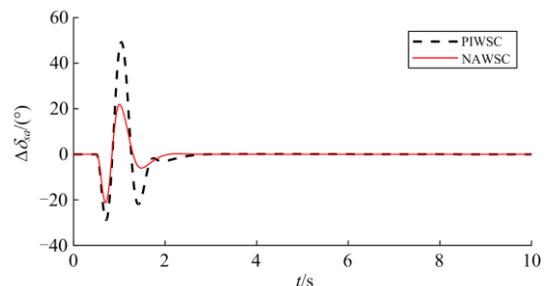
Fig. 9 Estimation error of observer for different states

3.3 不同运行工况下的适应性

进一步考虑在表 1 所示的其他运行方式下进行 PIWSC 和 NAWSC 的控制特性对比。

运行方式 2 中交流联络线 9-13 靠近 9 处 0.5 s 时三相接地短路, 0.6 s 时切除该线路, 1.1 s 时线路重合闸成功。不同附加控制在运行方式 2 下的响应曲线如图 10 所示。由图 10 可看出, 当故障位置发生变化时, 与图 6 相比, PIWSC 控制效果变化较为明显, 等值功角变化量最大值超过 50°, 而 NAWSC 控制效果也有所恶化, 但从功角振荡幅度大小和稳定时间来看, NAWSC 仍明显优于 PIWSC。

不同附加控制在运行方式 3 下的响应曲线如图 11 所示。由图 11 可看出, HVDC 输电功率增加时, NAWSC 控制下功角稳定的调节时间较运行方式 2 基本不变, NAWSC 相比 PIWSC 仍能取得更好的系统动态响应。



(a) 等值功角

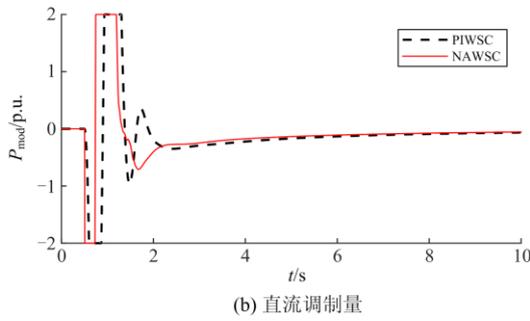


图 10 不同附加控制在运行方式 2 下的响应曲线
Fig. 10 Response curve of different additional control under the operation mode 2

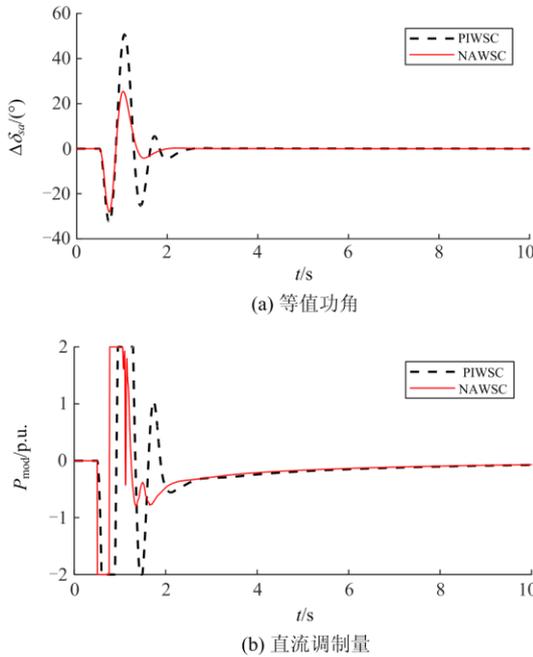


图 11 不同附加控制在运行方式 3 下的响应曲线
Fig. 11 Response curve of different additional control under the operation mode 3

由于 PIWSC 是在系统某一稳态工作点处设计得到，对工况适应性有限。而非线性自适应控制方法可将非线性动态及外部扰动全部进行补偿，因此在不同故障位置 and 不同交直流系统运行方式下，NAWSC 控制效果都明显优于 PIWSC。

3.4 参数不确定的控制鲁棒性

由图 7 可知，反馈线性化控制率计算因无法全部计及实际仿真模型详细非线性动态，FLWSC 的首摆振幅抑制效果不如 NAWSC。本小节进一步分析参数不确定对 FLWSC 和 NAWSC 的影响。

依旧在运行方式 1 下设置故障扰动：交流联络线 3-13 靠近母线 13 处 0.5 s 时发生三相接地短路，

0.6 s 时切除该线路，1.1 s 时线路重合闸。参数 H_{sa} 存在 $\pm 50\%$ 不确定时两种非线性控制下的等值功角 δ_{sa} 响应曲线如图 12 所示。同理，参数 T_d 存在 $\pm 50\%$ 不确定时等值功角 δ_{sa} 响应曲线如图 13 所示。此外，参数 H_{sa} 以及 T_d 同时存在 $\pm 50\%$ 不确定时两种非线性控制下的等值功角 δ_{sa} 响应曲线如图 14 所示。

由图 12(a)和图 13(a)可知，在 NAWSC 下，参数 H_{sa} 和 T_d 的变化几乎不影响等值功角，首摆及回摆的幅度基本没有变化。由此说明了 NAWSC 基本不受系统参数 H_{sa} 和 T_d 不确定的影响。由图 12(b)和图 13(b)可看出，在 FLWSC 控制下，参数 H_{sa} 和 T_d 的变化导致系统等值功角曲线出现小范围偏差，系统暂态稳定性控制效果受到影响。进一步可发现，FLWSC 控制下，参数 H_{sa} 主要影响系统等值功角的

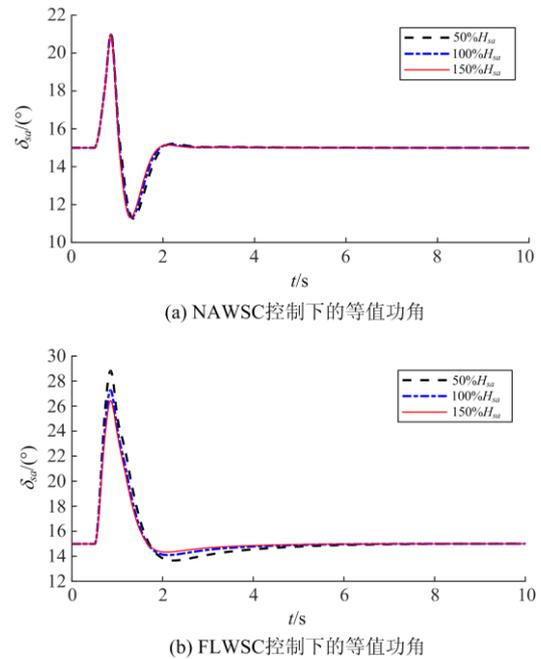
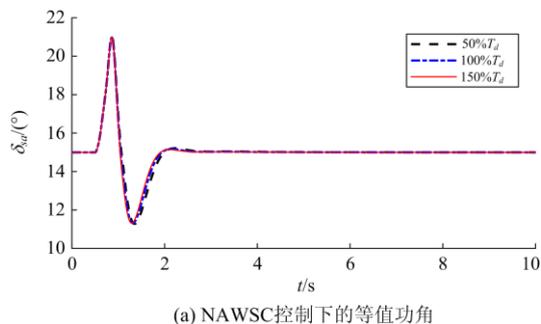


图 12 参数 H_{sa} 存在 $\pm 50\%$ 不确定时不同非线性控制下的等值功角曲线

Fig. 12 Equivalent power angle curves under different nonlinear controls with $\pm 50\%$ uncertainty of H_{sa}



(a) NAWSC控制下的等值功角

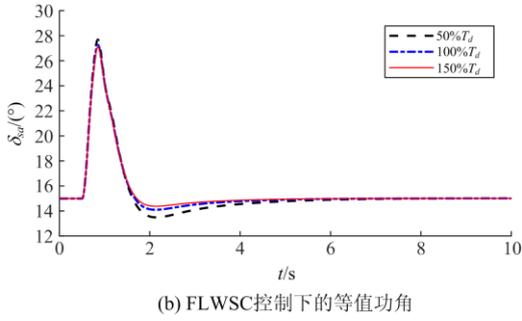


图 13 参数 T_d 存在 $\pm 50\%$ 不确定时不同非线性控制下的等值功角曲线

Fig. 13 Equivalent power angle curves under different nonlinear controls with $\pm 50\%$ uncertainty of T_d

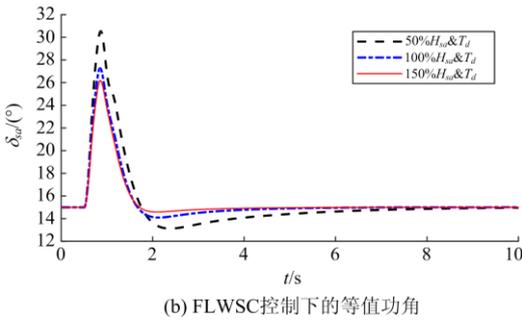
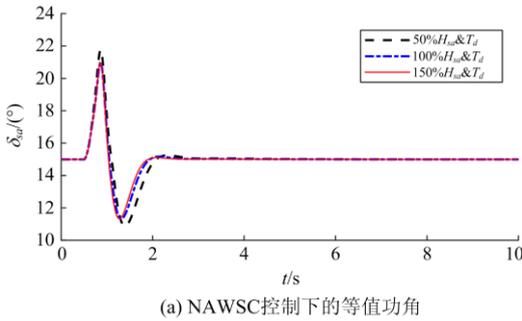


图 14 参数 H_{sa} 和 T_d 同时存在 $\pm 50\%$ 不确定时不同非线性控制下的等值功角曲线

Fig. 14 Equivalent power angle curves under different nonlinear controls with $\pm 50\%$ uncertainty of H_{sa} and T_d

首摆幅度, 对系统回摆略有影响; 参数 T_d 则主要影响系统回摆振幅, 对调节时间也略有影响。

由图 14 可知, 参数 H_{sa} 和 T_d 同时变化时, NAWSC 控制下的等值功角曲线变化明显比 FLWSC 控制时小很多, 两个参数偏小时 FLWSC 的控制性能恶化得更为严重。综上可知, FLWSC 对于参数不确定较敏感, 而 NAWSC 有更好鲁棒性。

4 算例分析 2

算例系统如图 15 所示, 该系统是在 IEEE10 机

39 节点系统基础上将 16-15 线路改造为高压直流输电线路形成交直流系统, 详细内容可参考文献[2]。

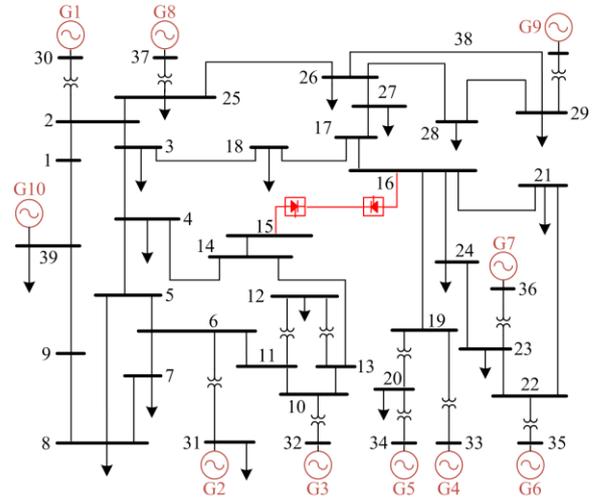


图 15 修改的 10 机 39 节点交直流混联系统

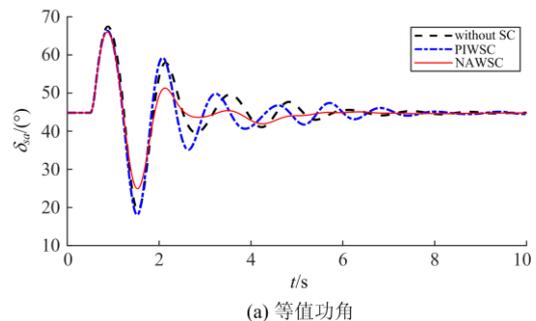
Fig. 15 Modified 10-machine 39-bus AC/DC hybrid system

按照前述方法推导 10 机 39 节点交直流混联系统的等值模型, 同样将等值转子角 δ_{sa} 为作为被控系统的输出对象。

PIWSC 的参数为: $k_p=4, k_i=15$ 。先整定 NAWSC 线性控制的三个极点为左半平面的 -5 处, 根据极点配置原理确定其反馈增益: $k_{f1}=125, k_{f2}=75, k_{f3}=15$; NAWSC 的状态及扰动观测器的极点配置为左半平面的 -30 处, 从而确定观测器增益为: $l_1=120, l_2=5\ 400, l_3=1.08 \times 10^5, l_4=8.1 \times 10^5$ 。

故障设置为: 区域交流联络线 17-27 靠近母线 27 处 0.5 s 时发生三相接地短路故障, 0.6 s 时切除该线路, 1.1 s 时线路重合闸成功。在该故障下, 不同 HVDC 广域附加控制下等值功角与直流调制量的响应曲线如图 16 所示。

由图 16 可看出, 无附加控制时系统受扰后系统暂态响应过程较长。传统 PIWSC 加入后, 系统首摆振幅有所减小, 但回摆时对功角有所恶化, 且振荡后期恢复时间较长。而在加入 NAWSC 以后, 相



(a) 等值功角

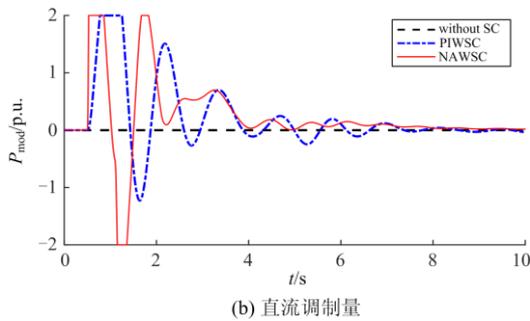


图 16 不同 HVDC 广域附加控制下的等值功角与直流调制量
Fig. 16 Equivalent power angle and DC modulation under different HVDC wide-area additional control

同故障下系统等值功角振荡幅值无论是首摆还是回摆过程中都相比加 PIWSC 要小, 且对后续振荡影响较小。综上, 相比 PIWSC, NAWSC 取得了更佳动态响应, 系统暂态稳定性进一步提升。

5 结论

本文设计了一种基于 HVDC 大信号调制方式的 NAWSC 以提高交直流混联系统的暂态稳定性。该控制器基于非线性自适应控制原理, 不需要准确的系统模型和全部状态变量反馈, 其利用扰动观测器可以自适应地估计和补偿实际系统中的非线性动态, 从而实现解耦的线性控制。基于此, 该控制器利用系统等值功角进行输出反馈, 直接实现暂态稳定控制。在四机两区域交直流混联系统和 10 机 39 节点交直流混联系统中进行仿真, 通过与 PIWSC 和 FLWSC 的对比研究, 主要结论如下:

1) NAWSC 与 FLWSC 相对于 PIWSC 更能提高交直流混联系统的暂态稳定性。NAWSC 取得了最佳动态响应, 系统暂态稳定性进一步提升且不会影响系统回摆。

2) FLWSC 无法计及系统全部非线性动态, 难以避免设计误差, 很大程度上恶化了 FLWSC 的控制效果。NAWSC 相比 FLWSC 更易于实现, 同时能够获得更好的控制效果。

3) 在不同运行工况下, NAWSC 相对于 PIWSC 具有更好的控制性能。在参数不确定时, NAWSC 相对于 FLWSC 具有更好的控制鲁棒性。

参考文献

[1] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 177-187.
LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.

and Control, 2019, 47(12): 177-187.

[2] 张志杰, 姚伟, 高磊, 等. 考虑发电机性能差异性的励磁顶值电压优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 41-49.
ZHANG Zhijie, YAO Wei, GAO Lei, et al. Optimal configuration of excitation system ceiling voltage considering different performance of generators[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 41-49.

[3] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.

[4] 孙士云, 束洪春, 唐岚, 等. 强励对交直流混合输电系统暂态稳定裕度的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 35-39.
SUN Shiyun, SHU Hongchun, TANG Lan, et al. Influence of forced excitation on transient stability margin of AC/DC hybrid power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 35-39.

[5] 章德, 田国梁, 谭玉东, 等. 提升交流系统暂态稳定性的多端直流最优紧急功率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 37-44.
ZHANG De, TIAN Guoliang, TAN Yudong, et al. Optimal control of MTDC for improving rotor angle stability of AC systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 37-44.

[6] WANG Youyi, HILL D J, MIDDLETON R H, et al. Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 620-627.

[7] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.
CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.

[8] 邹延生. 提高电力系统稳定性的 HVDC 和 SVC 非线性控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
ZOU Yansheng. The research on HVDC and SVC nonlinear control for improving power system stability[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

[9] 吕清洁, 徐政, 董桓锋, 等. 非并联运行交直流系统直流调制原理及附加控制器设计[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 548-555.
LÜ Qingjie, XU Zheng, DONG Huanfeng, et al. HVDC modulation principle and supplementary controller design method of non parallel AC/DC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 548-555.

[10] DASH P K, PUTHAL B, MALIK O P, et al. Transient stability and optimal control of parallel AC-DC power systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(3): 811-820.

- [11] DASH P K, RAHMAN M A, PANDA P C. Dynamic analysis of power systems with multiterminal HVDC links and static compensators[J]. IEEE Power Engineering Review, 1982, PAS-101(6): 1332-1341.
- [12] 洪元鑫. 基于紧急功率支援的 HVDC 技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
HONG Yuanxin. The research of HVDC based on emergency power support[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [13] 曾令康, 李大虎, 姚伟, 等. 适用于背靠背柔性直流输电的双环附加频率控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 113-120, 127.
ZENG Ling kang, LI Dahu, YAO Wei, et al. Dual-loop supplementary frequency control for BTB-VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 113-120, 127.
- [14] 陈凌云, 李兴源, 刘红超, 等. 高压直流输电系统非线性变结构控制器的设计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 6-9.
CHEN Lingyun, LI Xingyuan, LIU Hongchao, et al. Design of nonlinear variable-structure controller in HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 6-9.
- [15] JIANG L, WU Q H, WANG J, et al. Robust observer-based nonlinear control of multimachine power systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(6): 623-641.
- [16] JIANG L, WU Q H, WEN J Y. Decentralized nonlinear adaptive control for multimachine power systems via high-gain perturbation observer[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I: Regular Papers, 2004, 51(10): 2052-2059.
- [17] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [18] 毕悦, 刘天琪, 赵磊, 等. 风火打捆外送系统次同步振荡的改进自抗扰直流附加阻尼控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 174-180.
BI Yue, LIU Tianqi, ZHAO Lei, et al. DC additional damping control of subsynchronous oscillation based on improved active disturbance rejection control for wind-thermal-bundled power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 174-180.
- [19] 张刚, 雷勇, 李永凯, 等. 基于线性自抗扰技术的 SMES 储能变流器控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(11): 78-86.
ZHANG Gang, LEI Yong, LI Yongkai, et al. Control strategy for SMES energy storage converter based on linear active disturbance rejection control[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(11): 78-86.
- [20] 郭源博, 周鑫, 张晓华, 等. 三相电压型脉宽调制整流器的自抗扰控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 87-93.
GUO Yuanbo, ZHOU Xin, ZHANG Xiaohua, et al. Auto-disturbance rejection control for three-phase voltage-type PWM rectifier[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 87-93.
- [21] CHEN J, JIANG L, YAO W, et al. Perturbation estimation based nonlinear adaptive control of a full-rated converter wind turbine for fault ride-through capability enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2733-2743.
- [22] 周鑫. 含大规模风电的电力系统安全稳定控制若干问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
ZHOU Xin. Research on several issues of power system security and stability control with large scale wind power integration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [23] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖, 等. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [24] ZHANG Y, WEHENKEL L, ROUSSEAU P, et al. SIME: a hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1997, 19(3): 195-208.
- [25] NEDOLIVKO A V, BELYAEV A N. Improvement of transient stability analysis methods in verification of wide area control systems for long-distance AC interconnection[C] // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), February 2-3, 2016, St. Petersburg, Russia: 629-632.
- [26] 滕林, 刘万顺, 真志皓, 等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 65-70.
TENG Lin, LIU Wanshun, YUN Zhihao, et al. Study of real-time power system transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 65-70.
- [27] 李兴源, 陈凌云, 颜泉, 等. 多馈入高压直流输电系统非线性附加控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 16-19.
LI Xingyuan, CHEN Lingyun, YAN Quan, et al. Design of nonlinear complementary controllers for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 16-19.

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-05-06

作者简介:

张志杰(1995—), 男, 硕士, 研究方向为交直流混联电网稳定性分析与控制; E-mail: zj.sgo@foxmail.com

姚伟(1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向为含高比例新能源的交直流电力系统的稳定性分析与控制、新一代人工智能及其在电力系统中的应用等; E-mail: w.yao@hust.edu.cn

严才(1997—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制。E-mail: caiyan@hust.edu.cn

(编辑 周金梅)