

基于反步法的多馈入直流输电系统 调制控制器设计

王茂海¹, 孙元章¹, 宋永华²

(1. 清华大学电机系, 北京市 海淀区 100084; 2. 布鲁内尔大学电子与计算机工程系, 伦敦 UB8 3PH)

BACKSTEPPING DESIGN OF MODULATION CONTROLLER FOR MULTI-INFEED HVDC SYSTEMS

WANG Mao-hai¹, SUN Yuan-zhang¹, SONG Yong-hua²

(1. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. Department of Electronics and Computer Engineering, Brunel University, London UB8 3PH, U.K)

ABSTRACT: In this paper, AC/DC hybrid system is modeled as a cascade system, with DC system as the first subsystem and AC system as the second one. Based on this model, a nonlinear DC power modulation controller for multi-infeed HVDC links is presented. Firstly, a virtual control is designed to damp oscillations among generators in the receiving-end AC system; Secondly, DC power modulation strategy is designed to guarantee that, not only the output of the DC system can asymptotically track the desired virtual control but also the states of the entire cascade are not divergent. The modulation strategy designed by this paper provides two matrix parameters, K_D and K_V , which respectively determine the ability of the virtual control to improve the AC system's performance and the ability of DC system's output to track the virtual control. Simulation results on a 10-machine 39-bus AC system with 5 DC links located in it show that the modulation strategy designed by this paper is very effective.

KEY WORDS: Power systems; Cascade systems; HVDC transmission; HVDC transmission control; Nonlinear systems

摘要: 该文将整个交直流混合电力系统建模为一个级联系统: 直流系统为第一级, 交流系统为第二级, 并为多馈入直流输电系统设计了非线性调制策略: 为交流子系统设计虚拟控制, 该虚拟控制能够增强交流子系统的阻尼; 对直流子系统进行调制策略设计, 使得交流子系统的输出能够渐近地跟踪所要求的虚拟控制, 并保证整个系统的状态不分散。所设计的调制策略提供了 2 个正定矩阵参数 K_D 和 K_V 。矩阵 K_D 决定了虚拟控制增强交流系统阻尼的能力; 矩阵 K_V 决定了

直流子系统的输出渐近地跟踪虚拟控制的能力。仿真结果验证了文中方法的有效性。

关键词: 电力系统; 级联系统; 直流输电; 直流调制; 非线性系统

1 引言

直流输电调制被广泛用于提高交流系统的稳定性和阻尼系统振荡^[1-9]。然而, 到目前为止, 大部分直流调制控制器的设计都是基于系统的近似线性化模型, 并且只考虑单馈入直流的情况^[1-4]。

多馈入直流输电具有更强的可控性^[5]。文献[6-8]对多馈入直流输电系统的调制控制器设计进行了研究, 但其研究对象只局限于双馈入的情况, 且系统模型为近似线性化模型。

近似线性化模型的缺点是只在某一运行点附近较好地近似了系统特性。在大扰动的情况下, 由于电力系统强非线性的本质, 要求所设计的控制器能在较大的范围内发挥作用, 近似线性化模型无法达到这一要求。文献[9]提出了一种多馈入直流输电的非线性紧急功率调制策略, 但该文的研究对象只考虑双馈入的情况, 而控制规律却十分复杂。该文方法难以方便地推广到更复杂的系统。

本文的研究对象是多馈入直流输电系统。整个交直流混合电力系统建模为一个级联系统: 直流系统为第一级, 交流系统为第二级。文中首先为交流子系统设计虚拟控制, 该虚拟控制能够增强交流子系统的阻尼; 然后对直流子系统进行调制策略设计,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50377017)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50377017).

该调制策略使得交流子系统的输出能够渐近地跟踪所要求的虚拟控制,并保证整个系统的状态不发散。所设计的调制策略提供了2个正定矩阵参数 \mathbf{K}_D 和 \mathbf{K}_V 。矩阵 \mathbf{K}_D 决定了虚拟控制增强交流系统阻尼的能力;矩阵 \mathbf{K}_V 决定了直流子系统的输出跟踪虚拟控制的能力。仿真结果验证了本文方法的有效性。

2 系统建模

2.1 交流系统模型

含有 k 台发电机、 r 个负荷和 m 条直流线路的多馈入交/直流电力系统如图1所示。设交流系统共有 n 个节点(地节点不包括在内),即 $k+r+m=n$ 。各台发电机都采用经典二阶模型,负荷都视为恒阻抗。

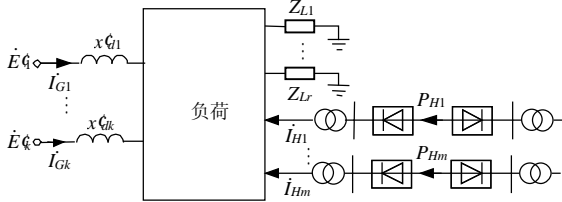


图1 多馈入交/直流电力系统

Fig. 1 A general multi-infeed AC/DC system containing k generators, r loads and m HVDC links

由图1,有

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_H \\ \dot{\mathbf{I}}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{HH} & \mathbf{Y}_{HG} \\ \mathbf{Y}_{GH} & \mathbf{Y}_{GG} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_H \\ \dot{\mathbf{E}}' \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{I}}_H &= [\dot{I}_{H1} \ \cdots \ \dot{I}_{Hm}]^T; \quad \dot{\mathbf{U}}_H = [\dot{U}_{H1} \ \cdots \ \dot{U}_{Hm}]^T; \\ \dot{\mathbf{I}}_G &= [\dot{I}_{G1} \ \cdots \ \dot{I}_{Gk}]^T; \quad \dot{\mathbf{E}}' = [\dot{E}'_1 \ \cdots \ \dot{E}'_k]^T; \\ \mathbf{Y} &= \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{HH} & \mathbf{Y}_{HG} \\ \mathbf{Y}_{GH} & \mathbf{Y}_{GG} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

\mathbf{Y} 为消去其他节点,仅保留发电机和直流节点之后而形成的节点导纳矩阵。

由式(1)有

$$\dot{\mathbf{I}}_G = \mathbf{Y}' \cdot \dot{\mathbf{E}}' + \mathbf{Y}'' \cdot \dot{\mathbf{I}}_H \quad (2)$$

其中 $\mathbf{Y}' = \mathbf{Y}_{GG} - \mathbf{Y}_{GH} \mathbf{Y}_{HH}^{-1} \mathbf{Y}_{HG}$; $\mathbf{Y}'' = \mathbf{Y}_{GH} \mathbf{Y}_{HH}^{-1}$ 。

第 i 台发电机的功率输出为

$$\begin{aligned} P_{ei} &= \text{Re}[\dot{E}'_i \cdot (\dot{I}_{Gi})^*] = \sum_{j=1}^k [C_{ij} \sin d_{ij} + D_{ij} \cos d_{ij}] + \\ & E'_i \sum_{j=1}^m \{ [G''_{ij} \cos(d_i - r_j) + B''_{ij} \sin(d_i - r_j)] \cdot I_{Hj} \} \quad (3) \end{aligned}$$

式中 $d_{ij} = \delta_i - \delta_j$, δ_i 为第 i 台发电机的转子角; r_j 为 \dot{I}_{Hj} 的相角; $C_{ij} = E'_i E'_j B'_{ij}$, $D_{ij} = E'_i E'_j G'_{ij}$; G'_{ij} 和 B'_{ij} 为矩阵 \mathbf{Y} 的第 $(ij)^{\text{th}}$ 个元素的实部和虚部; G''_{ij} 和 B''_{ij}

为矩阵 \mathbf{Y} 的第 $(ij)^{\text{th}}$ 个元素的实部(虚部)。

第 j 条直流线路馈入的功率为

$$P_{Hj} = U_{Hj} I_{Hj} \cos j_{Hj} \quad (4)$$

式中 j_{Hj} 为第 j 条直流线路换流站母线电压相量

$\dot{U}_{Hj} = U_{Hj} e^{jq_{Hj}}$ 和 \dot{I}_{Hj} 间的相角差。

由式(4)知,第 i 台发电机的功率输出可表示为

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^k [C_{ij} \sin d_{ij} + D_{ij} \cos d_{ij}] + \sum_{j=1}^m K_{ij} P_{Hj} \quad (5)$$

式中

$$K_{ij} = \frac{E'_i [G''_{ij} \cos(d_i - r_{Hj}) + B''_{ij} \sin(d_i - r_{Hj})]}{U_{Hj} \cos j_{Hj}} \quad (6)$$

式中 K_{ij} 为影响因子,决定了第 j 条直流线路的功率调制对第 i 台发电机的影响。

第 i 台发电机的转子运动方程为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\delta}_i &= \Delta \omega_i \cdot \omega_0, \quad (i=1, \dots, k) \\ \Delta \dot{\omega}_i &= \frac{1}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei} - D_i \Delta \omega_i) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\Delta \delta_i = \delta_i - \delta_i^s$; $\Delta \omega_i = \omega_i - \omega_0$; ω_0 为第 i 台发电机的转子角速度; P_{mi} 为原动机功率; D_i 为阻尼系数; H_i 为惯性时间常数。

2.2 直流线路模型

如果只考虑交/直流系统的稳定性,则直流线路的详细动态特性可以忽略。将直流线路等效为一阶惯性环节如下^[10]:

$$\dot{P}_{Hj} = \frac{1}{T_{Hj}} [-P_{Hj} + (P_{Hj}^{\text{ref}} + u_{Hj})], \quad (j=1, \dots, m) \quad (8)$$

式中 P_{Hj} 为第 j 条直流线路的馈入功率; P_{Hj}^{ref} 为 P_{Hj} 的参考值; u_{Hj} 为第 j 条直流线路的控制变量; T_{Hj} 为第 j 条直流线路的等效时间常数。

第 j 条线路的功率调制量为 $\Delta P_{Hj} = P_{Hj} - P_{Hj}^{\text{ref}}$ 。

在稳态时 $\Delta P_{Hj} = 0$,式(8)可以改写为

$$\Delta \dot{P}_{Hj} = \frac{1}{T_{Hj}} (-\Delta P_{Hj} + u_{Hj}), \quad (j=1, \dots, m) \quad (9)$$

2.3 整个交/直流系统模型

图1所示的交/直流系统可用级联系统表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \mathbf{P}_H^{\text{ref}} + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{P}_H \\ \Delta \dot{\mathbf{P}}_H = \mathbf{A}(-\Delta \mathbf{P}_H + \mathbf{u}_H) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{x} = [\Delta d_1 \ \cdots \ \Delta d_k \ \Delta \omega_1 \ \cdots \ \Delta \omega_k]^T$;

$$\mathbf{A} = \text{diag}\{1/T_{H1} \ 1/T_{H2} \ \cdots \ 1/T_{Hm}\};$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = - \begin{bmatrix} 0_{k \times m} & & & \\ K_{11}/2H_1 & \cdots & K_{1m}/2H_1 & \\ \vdots & & \vdots & \\ K_{1m}/2H_k & \cdots & K_{km}/2H_k & \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$f_1(x) = \begin{bmatrix} \Delta w_1 \cdot w_0 \\ \vdots \\ \Delta w_k \cdot w_0 \\ \left(P_{m1} - D_1 \Delta w_1 - \sum_{j=1}^k [C_{1j} \sin d_{1j} + D_{1j} \cos d_{1j}] \right) / 2H_1 \\ \vdots \\ \left(P_{mk} - D_k \Delta w_k - \sum_{j=1}^k [C_{kj} \sin d_{kj} + D_{kj} \cos d_{kj}] \right) / 2H_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

3 控制器设计

3.1 设计思路

由式(10)可知, 图 1 所示的多馈入直流输电系统可以表示为一个级联系统。令 $f(x) = f_1(x) + G(x)P_H^{\text{ref}}$, 则式(10)可重写如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x) + G(x)\Delta P_H \\ \Delta \dot{P}_H = A(-\Delta P_H + u_H) \end{cases} \quad (13)$$

式(13)所示的级联系统如图 2 所示。

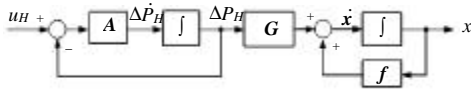


图 2 式(13)所示的级联系统

Fig. 2 The block diagram of the cascade system (13)

Backstepping 设计方法为级联系统的控制设计提供了很好的控制逻辑^[11]。对于式(13)描述的多馈入直流输电系统, 其调制控制器设计思路如下:

(1) 为交流子系统设计虚拟控制 $s(x)$, 要求该虚拟控制能够提高交流系统的渐近稳定性;

(2) 为直流子系统设计调制控制律 u_H , 要求该调制规律能够保证直流子系统的输出 ΔP_H 与虚拟控制 $s(x)$ 间的误差渐近地趋于零, 即直流子系统的输出 ΔP_H 渐近地跟踪虚拟控制 $s(x)$ 。

3.2 交流子系统虚拟控制 $s(x)$ 的设计

将 ΔP_H 看作交流子系统的输入, 设计虚拟控制 $s(x)$, 使得当 $\Delta P_H = s(x)$ 时, 式(14)表述的交流子系统的渐近稳定性能够提高。

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + G(x)\Delta P_H = f(x) + G(x)s(x) \quad (14)$$

x 子系统的暂态能量函数为^[12]

$$W(x) = \sum_{i=1}^k H_i w_0 \cdot \Delta w_i^2 + \sum_{i=1}^k \int_0^{\Delta d} (-P_{mi} + P_{ei}) d(\Delta d) \quad (15)$$

式中 P_{ei} 为无直流调制时第 i 台发电机的电功率。

由于耗散势能的存在, 式(15)所示的暂态能量函数并不是严格的 Lyapunov 函数, 但式(15)所示的暂态能量函数具有明确的物理意义。仿真实践表明, 可以将其近似地做为 Lyapunov 函数。

当 $\Delta P_H = \sigma(x)$ 时, $W(x)$ 对 x 的偏导数和对时间的导数分别为

$$\begin{aligned} (\partial W(x)/\partial x)^T = & \begin{bmatrix} -P_{m1} + \sum_{j=1}^m K_{1j} P_{Hj} + \sum_{j=1}^k [C_{1j} \sin d_{1j} + D_{1j} \cos d_{1j}] \\ \vdots \\ -P_{mk} + \sum_{j=1}^m K_{kj} P_{Hj} + \sum_{j=1}^k [C_{kj} \sin d_{kj} + D_{kj} \cos d_{kj}] \\ 2H_1 w_0 \cdot \Delta w_1 \\ \vdots \\ 2H_k w_0 \cdot \Delta w_k \end{bmatrix} \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} dW/dt = \partial W/\partial x \cdot [f(x) + G(x)s(x)] = & -\sum_{i=1}^k D_i w_0 \cdot \Delta w_i^2 + \frac{\partial W}{\partial x} \cdot G(x)s(x) \quad (17) \end{aligned}$$

如果虚拟控制 $\sigma(x)$ 取如下形式:

$$\sigma(x) = -K_D \cdot \left[\frac{\partial W}{\partial x} G(x) \right]^T \quad (18)$$

式中 K_D 为一正定矩阵, 则

$$\begin{aligned} dW/dt = & -\sum_{i=1}^k D_i w_0 \cdot \Delta w_i^2 - \\ & [(\partial W/\partial x)G(x)] \cdot K_D \cdot [(\partial W/\partial x)G(x)]^T \quad (19) \end{aligned}$$

由式(19)可以看出, 式(18)所示的虚拟控制能够加快交流子系统 Lyapunov 函数的下降速度, 增强交流子系统的渐近稳定性。

3.3 直流子系统调制策略 u_H 的设计

直流子系统调制控制律 u_H 的设计目标为: 保证直流子系统的输出 ΔP_H 与虚拟控制 $s(x)$ 间的误差渐近地趋于零, 即直流子系统的输出 ΔP_H 渐近地跟踪虚拟控制 $s(x)$ 。直流子系统的输出 ΔP_H 与虚拟控制 $s(x)$ 间的误差为

$$v = \Delta P_H - s(x) \quad (20)$$

将式(20)代入式(13), 得

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x) + G(x)s(x) + G(x)v \\ \dot{v} = A[-(s(x) + v) + u_H] - \dot{s} \end{cases} \quad (21)$$

构造一个正定函数

$$V(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = W(\mathbf{x}) + \mathbf{v}^T \mathbf{v} / 2 \quad (22)$$

该正定函数对时间的导数为

$$\dot{V} = (\partial W / \partial \mathbf{x}) \cdot [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{s}(\mathbf{x})] + \mathbf{v}^T \{ [\partial W / \partial \mathbf{x}] \mathbf{G}(\mathbf{x}) \}^T + \mathbf{A}(-\Delta \mathbf{P}_H + \mathbf{u}_H) - \dot{\mathbf{s}} \} \quad (23)$$

如果直流系统的控制变量为

$$\mathbf{u}_H = \Delta \mathbf{P}_H + \mathbf{A}^{-1} \left\{ \dot{\mathbf{s}} - \left[\frac{\partial W(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{G}(\mathbf{x}) \right]^T - \mathbf{K}_V \cdot [\Delta \mathbf{P}_H - \mathbf{s}(\mathbf{x})] \right\} \quad (24)$$

式中 \mathbf{K}_V 为一正定阵, 则

$$\dot{V} = \frac{\partial W}{\partial \mathbf{x}} \cdot [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \sigma(\mathbf{x})] - \mathbf{v}^T \mathbf{K}_V \mathbf{v} \leq 0 \quad (25)$$

将式(19)代入式(25)有

$$\dot{V} = - \sum_{i=1}^k D_i w_0 \cdot \Delta w_i^2 - \mathbf{v}^T \cdot \mathbf{K}_V \cdot \mathbf{v} - [\partial W / \partial \mathbf{x}] \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{K}_D \cdot [\partial W / \partial \mathbf{x}] \mathbf{G}(\mathbf{x})^T \quad (26)$$

由 Lyapunov 定理可知, 式(24)所示的控制器是整个级联系统的镇定控制器。

取正定矩阵 \mathbf{K}_D 和 \mathbf{K}_V 为对角阵。设 $b_j > 0$, 是 \mathbf{K}_D 的第 j 个对角元素; $c_j > 0$, 是 \mathbf{K}_V 的第 j 个对角元素, 则对第 j 条直流线路, 其调制规律为

$$u_{Hj} = k_j \Delta P_{Hj} + \sum_{i=1}^k K'_{ij} \Delta w_i + \sum_{i=1}^k K''_{ij} \Delta \dot{w}_i \quad (27)$$

式(27)中各反馈系数为

$$k_j = 1 - T_j c_j \quad (28)$$

$$K'_{ij} = T_j b_j [(1 + b_j c_j) K_{ij} + b_j \dot{K}_{ij}] \quad (29)$$

$$K''_{ij} = T_j b_j K_{ij} \quad (30)$$

由式(27)可以看出, 对每条直流线路而言, 有

(1) 当 \mathbf{K}_D 和 \mathbf{K}_V 为常对角阵时, 调制规律 u_{Hj} 是 ΔP_{Hj} 、 $\Delta \omega$ (发电机转速偏差) 及 $\Delta \dot{w}$ (转速偏差的微分) 的反馈控制;

(2) ΔP_{Hj} 的反馈系数 k_j 为常数; Δw 的反馈系数 K'_{ij} 及 $\Delta \dot{w}$ 的反馈系数 K''_{ij} 与影响因子有关, 是各发电机内电势 (相量) 和直流换流站对交流系统的注入电流 (相量) 的非线性函数。

4 仿真研究

为检验本文所设计的多馈入直流调制控制器, 在图3所示的系统上进行了仿真验证, 无直流调制控制时, 仿真结果如图4所示, 在采用本文设计的调制策略 ($\mathbf{K}_D=20\mathbf{M}$, $\mathbf{K}_V=10\mathbf{M}$, \mathbf{M} 为单位矩阵) 的

情况下, 仿真结果如图5所示。图5中, 5条直流线路由一足够稳定的交流系统向 IEEE 39 节点标准系统送电。IEEE 39 节点系统的详细网络结构、节点、线路以及发电机参数见文献[13]。

假设5条直流线路分别与 IEEE 39 节点系统的节点 3、7、20、23 和 28 相连, 为便于研究, 本文算例修正了节点 3、7、20、23 和 28 的负荷, 使得在稳态情况下, 每条直流线路向 IEEE 39 节点系统馈入功率为 1000MW。

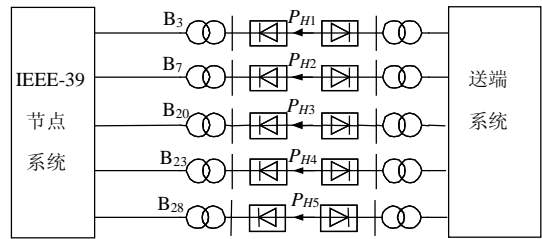


图3 多馈入直流输电系统算例
Fig. 3 Simulation example of MIDC system

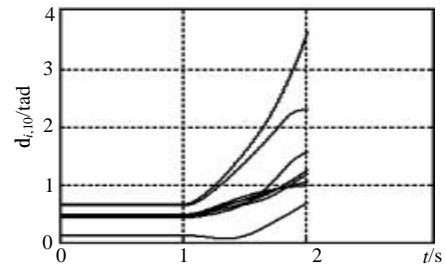


图4 仿真算例 (无直流调制控制)
Fig. 4 Simulation Results (without modulation control)

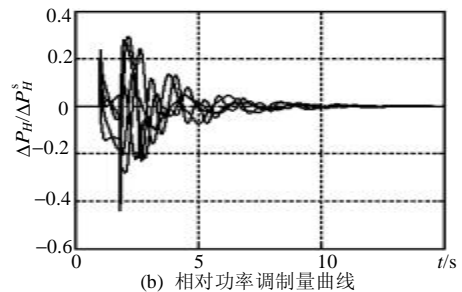
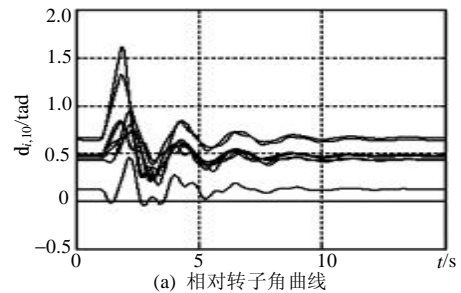


图5 仿真算例 (有直流调制)
Fig. 5 Simulation results (with modulation controller in operation)

仿真过程中假设送电端的交流系统足够稳定(因为只研究 IEEE 39 节点系统的稳定性), IEEE 39 节点系统中所有发电机都采用经典二阶模型, 所有负荷考为恒阻抗, 所有发电机的阻尼系统均为 0, 直流系统采用准稳态模型。IEEE-39 节点系统的节点 15 和节点 16 于 1s 时通过标么值为 0.02 的电阻接地, 故障于 1.8s 时清除。比较图 5 和图 4 可知, 本文设计的调制控制器十分有效。

5 结论

本文为多馈入直流输电系统设计了非线性调制策略。系统模型被建立为级联形式, 采用 backstepping 设计方法, 设计思路十分清晰。

本文所设计的调制规律的实现需要借助于广域测量系统。随着相量测量技术的发展^[14]和基于 GPS 的广域测量技术的广泛应用, 同步地获取系统状态是可行的。从经济上也是更加合理的^[15]。

本文后续工作的重点研究方向为信号量测和传输时延对控制器性能的影响等。

参考文献

- [1] 刘红超, 李兴源. 基于 PRONY 辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 54-57.
Liu Hongchao, Li Xingyuan. Study of DC damping control in AC/DC transmission systems based on prony method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 54-57.
- [2] 黄莹, 徐政. 基于同步相量测量单元的直流附加控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 7-12.
Huang Ying, Xu Zheng. HVDC supplementary controller based on synchronized phasor measurement units[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 7-12.
- [3] 江全元, 程时杰, 曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 87-91.
Jian Quanyuan, Cheng Shijie, Cao Yijia. Design of HVDC supplementary subsynchronous damping controller using genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 87-91.
- [4] 荆勇, 杨晋柏, 李柏青, 等. 直流调制改善交直流混联系统暂态稳定性的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 1-4.
Jing Yong, Yang Jinbai, Li Baiqing *et al.* Research on improving transient stability of AC/DC hybrid system by HVDC modulation [J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 1-4.
- [5] 毛晓明, 管霖, 张尧, 等. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 68-73.
Mao Xiaoming, Guan Lin, Zhang Yao *et al.* Research on HVDC modeling for AC/DC hybrid grid with multi-infeed HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 68-73.
- [6] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.
Liu Hongchao, Li Xingyuan, Wang Lu *et al.* Coordination and optimization of HVDC modulations in multi-infeed HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 5-9.
- [7] Ngamroo I. A stabilization of frequency oscillations using a power modulation control of HVDC link in a parallel AC-DC interconnected system[C]. Proceedings of Power Conversion Conference PCC, Osaka 2002, 3: 1405-1410.
- [8] Pilotto L A S, Szechtman M, Wey A *et al.* Synchronizing and damping torque modulation controllers for multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(3): 1505-1513.
- [9] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 混合交直流电力系统的非线性调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 1-6.
Yang Weidong, Xu Zhen, Han Zhenxiang. A nonlinear modulation strategy for hybrid AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 1-6.
- [10] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993
- [11] Sepulchre R, Janković M, Kokotović P. Constructive nonlinear control[M]. London, Springer, 1997.
- [12] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [13] Pai M A. Energy function analysis for power system stability [M]. Boston, MA: Kluwer, 1989.
- [14] Wang Maohai, Sun Yuanzhang. A practical, precise method for frequency tracking and phasor estimation[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(4): 1547-1552.
- [15] Chaudhuri B, Pal B. Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC[J]. IEEE Trans. on Power System, 2004, 19(1): 499-506.

收稿日期: 2005-06-27。

作者简介:

王茂海 (1976-), 男, 山东威海人, 博士研究生, 现正在从事多馈入直流输电调制策略的研究、相量测量方法及功率理论的研究;

孙元章 (1954-), 男, 湖南岳阳人, 长江学者特聘教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统稳定与控制;

宋永华 (1964-), 男, 四川人, 英国 Brunel 大学教授, 英国皇家工程院院士, IEEE 高级会员, 主要从事电力系统的建模、仿真、故障诊断、优化控制以及调度决策方面的研究工作。