

同时抑制低频振荡和次同步振荡的多通道 广域自适应阻尼控制*

曾果^{1)†} 李兴源¹⁾ 刘天琪¹⁾ 赵睿²⁾

1) (四川大学电气信息学院, 成都 610065)

2) (中国南方电网科学研究院, 广州 510080)

(2014年5月26日收到; 2014年6月29日收到修改稿)

设计了一种自适应控制算法并证明了其正确性. 通过总体最小二乘旋转不变技术辨识出系统降阶模型及相关振荡模态, 利用带通滤波器将不同的振荡模态分解到多个通道, 然后基于所提的自适应算法对每个振荡模态设计了自适应控制器, 减小了各个控制器间的影响. 在电磁暂态程序PSCAD/EMTDC中对向上直流孤岛运行方式进行了仿真验证. 结果表明: 所提控制方法相对传统比例积分微分控制有更好的控制效果; 对于系统发生不同故障时具有鲁棒性. 对于系统信号传输引起的时滞导致的控制器效果变差的问题, 可以通过相位补偿解决.

关键词: 超稳定理论, 系统辨识, 振荡, 自适应阻尼控制

PACS: 88.80.hj, 84.70. + p, 02.30.Yy

DOI: 10.7498/aps.63.228801

1 引言

在电力系统联网的大背景下, 交直流并存已成为电网发展的必然趋势. 目前, 向上、锦苏、浙西直流送端均位于四川电网, 形成了电力系统送端多直流落点^[1,2]. 弱阻尼的低频振荡和次同步振荡是大规模电网互联所面临的典型挑战, 电力系统稳定器(PSS)是传统抑制低频振荡最为经济有效的方法之一^[3-5]. 但PSS采集本地信号作为反馈导致信号选取缺少自由度和区间的协调控制存在困难; 同时, 系统运行方式的改变可能会使PSS参数失效, 导致控制效果变差. 所以即使安装大量PSS仍然存在低频振荡的可能. 南方电网已安装超过300台PSS, 但低频振荡仍然时有发生^[6]. 高压直流输电(HVDC)的功率调节能力对提高电力系统的稳定性具有重要作用^[7], 为提高直流线路的系统稳定性提供了有效的手段.

利用交直流系统对系统振荡进行抑制的方法

一般分两类. 一类是通过系统的物理理论推导出系统中物理量间的数学关系后提出相关的抑制措施: 文献^[8]建立了交直流系统发电机转速到电气转矩的传递函数, 分析了抑制次同步振荡原理方法; 文献^[9]建立了多机系统直流输电引起的次同步振荡的线性化数学模型并提出了抑制措施, 但这种方法对于实际中的大电网系统并不实用. 另一类是通过广域测量系统(WAMS)对系统中的物理量进行辨识后利用直流附加控制对振荡进行抑制: 文献^[10, 11]通过WAMS测得的同步时钟信号并基于总体最小二乘-旋转不变技术参数估计(TLS-ESPRIT)算法实现了低频振荡在线辨识; 文献^[12]通过TLS-ESPRIT技术辨识出系统模型并采用射影定理的降阶控制方法设计了直流系统的附加控制来抑制系统振荡; 文献^[13]利用滑模变结构控制方法设计了鲁棒控制器来提高系统稳定性; 文献^[14]则通过预测控制方法设计控制器抑制系统区域内振荡. 这些控制方法取得了一定研究成果, 但必须注意当系

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 51037003)和国家高新技术研究发展计划(批准号: 2011AA05A119)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: garfield1236@163.com

统运行发生变化时, 控制器是否会失效甚至激发新的振荡模式也是需要考虑的. 而自适应控制则能够较好地克服这个缺点. 文献 [15, 16] 将多变量自适应控制运用于非线性系统, 文献 [17] 则将其运用于时滞系统, 都取得了很好的控制效果. 此外, 现有的研究同时抑制低频振荡和次同步振荡的文献很少. 虽然低频振荡和次同步振荡来源于不同的物理机理, 但在控制系统中两种振荡模式的阻尼存在耦合. 文献 [18] 对这种阻尼耦合特性进行了分析, 但也未能给出解决方案.

本文设计了一种自适应算法, 用超稳定理论证明了其正确性, 并基于 TLS-ESPRIT 辨识技术辨识出系统的振荡模态, 然后将其分解为多个通道, 通过模型参考自适应控制 (MRAS) 设计了直流系统的附加控制器. 为简化设计过程, 系统参考模型的实现利用零极点配置方法, 并且采用多通道设计方法对于不同振荡模式分别设计控制器, 以减小不同振荡模式阻尼的影响. 将该控制策略运用于四川电网向上直流送端孤岛运行方式, 以向上直流进行调制, 利用电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC 对所提控制策略进行仿真验证, 和传统比例积分微分 (PID) 控制相比具有更好的动态特性, 对不同的故障和运行方式具有鲁棒性.

2 基于超稳定理论的自适应控制算法设计

设非线性控制系统描述形式如方程 (1), 其控制输入为非线性形式.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x(t) + \phi[\mathbf{u}(t)] + d(\mathbf{x}, t), \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (1)$$

$\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为系统状态向量; $\phi[\mathbf{u}(t)] = [\phi_1(u_1), \dots, \phi_m(u_m)]^T \in \mathbf{R}^m$ 为连续非线性输入向量, 且 $\phi(0) = 0$; $d(\mathbf{x}, t)$ 为系统的不可控干扰信号. 定义局部有界函数 [19] 如下.

定义 1 如果存在常数 δ_{i1}, δ_{i2} 使得 $\delta_{i1} \leq \phi_i(u_i)/u_i \leq \delta_{i2}, i = 1, \dots, m$, 则 $\phi_i(u_i)$ 对任意 u_i 是部分有界函数, $u_i = [u_1, \dots, u_m]^T$.

假设 1 如果非线性输入函数 $\phi_i(u_i)$ 对 u_i 是部分有界函数, $i = 1, \dots, m$, 则下面的条件满足:

$$\delta_{i1} \leq \frac{\phi_i(u_i)}{u_i} \leq \delta_{i2} \quad i = 1, \dots, m. \quad (2)$$

假设 2 如果系统不确定干扰量 $d(\mathbf{x}, t)$ 范数有界, 则存在正实函数 $\eta(t)$, 使得 $\|d(\mathbf{x}, t)\| \leq \eta(t)$.

对于部分有界函数 $\phi_i(u_i)$, 由假设 1 可得

$$\begin{aligned} \delta_{i1}u_i^2 &\leq u_i\phi_i(u_i) \leq \delta_{i2}u_i^2 \quad i = 1, \dots, m \Rightarrow \\ \delta_{11}u_1^2 + \dots + \delta_{m1}u_m^2 &\leq u_1\phi_1(u_1) + \dots + u_m\phi_m(u_m) \\ &\leq \delta_{12}u_1^2 + \dots + \delta_{m2}u_m^2. \end{aligned} \quad (3)$$

将 (3) 式写成向量形式, 可以得出

$$\delta_1 \mathbf{u}^T \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^T \phi(\mathbf{u}) \leq \delta_2 \mathbf{u}^T \mathbf{u}, \quad (4)$$

(4) 式中

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \min\{\delta_{i1} | i = 1, \dots, m\}, \\ \delta_2 &= \max\{\delta_{i2} | i = 1, \dots, m\}. \end{aligned}$$

自适应控制的目标是找到一个合适输入向量 $\mathbf{u}(t)$ 使得控制目标输出向量 \mathbf{y}_p 能够跟踪参考输出向量 \mathbf{y}_m , 并且保证控制对象参数变化时所有的控制信号有界. 对于参考模型的状态方程给定如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= \mathbf{A}_m x_m(t) + \mathbf{B}_m r(t), \\ \mathbf{y}_m &= \mathbf{C}_m x_m, \end{aligned} \quad (5)$$

x_m 是参考模型的状态变量, r 为参考模型输入, \mathbf{y}_m 为参考模型输出, \mathbf{A}_m 是赫尔维茨 (Hurwitz) 矩阵. 为了使控制目标跟踪参考模型输出, 下面将基于超稳定理论设计具有鲁棒性的自适应控制规律. 设系统的广义误差为

$$e_m = \mathbf{x}(t) - x_m(t). \quad (6)$$

则广义误差的状态方程可表示如下 [20]:

$$\begin{aligned} \dot{e}_m &= \mathbf{A}_m e + (\mathbf{A} - \mathbf{A}_m)x + \mathbf{B}\phi(\mathbf{u}) + d - \mathbf{B}_m r \\ &= \mathbf{A}_m e - \mathbf{B}_1 \omega, \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式中 \mathbf{B}_1 为非奇异矩阵, 并且有

$$-\mathbf{B}_1 \omega = (\mathbf{A} - \mathbf{A}_m)x + \mathbf{B}\phi(\mathbf{u}) + d - \mathbf{B}_m r. \quad (8)$$

广义线性误差的线性组合可定义为如下形式:

$$S = \mathbf{T}e, \quad (9)$$

式中 $\mathbf{T} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 为非奇异矩阵.

根据上面的定义可构造线性时不变系统:

$$\dot{e}_m = \mathbf{A}_m e - \mathbf{B}_1 \omega, \quad v = \mathbf{T}e. \quad (10)$$

引理 1 [21] 如果 $G(s)$ 为严格正式函数, 且 (A, B, C) 为 $G(s)$ 的最小实现, 则存在正定对称矩阵 P 和半正定矩阵 Q , 使得:

$$PA + A^T P = -Q, \quad (11)$$

$$PB = C^T. \quad (12)$$

为了使控制目标输出能够跟踪参考模型, 传递函数 $T(sI - A_m)^{-1}B_1$ 必须为严格正实. 根据引理 1, 由于 A_m 是 Hurwitz 矩阵, 则一定存在矩阵 P 和 Q 使得 (11) 式成立, 故根据 (9), (11), (12) 式可以求得矩阵

$$T = (PB_1)^T. \quad (13)$$

保证前向通道传递函数为严格正实以后, 自适应控制率可被设计为

$$u(t) = -\frac{(B_1^{-1})^T v}{\|v^T\|} \varphi(x, t), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \varphi(x, t) \\ &= \frac{\|B_1^{-1}(A - A_m)x\| + \|B_1^{-1}B_m r\| + \hat{k}(t)}{\delta_1 [B_1^{-1}(B_1^{-1})^T]}, \end{aligned} \quad (15)$$

$\hat{k}(t)$ 是 $k(t) = \|B_1^{-1}\|\eta(t)$ 的估计值, 其作用为更新自适应算法

$$\hat{k}(t) = \lambda \int_{t_1}^{t_2} \|v^T\| d\tau + k(t), \quad (16)$$

(16) 式中正实数 λ 决定自适应率更新速率. 对于本文所提的模型参考自适应控制策略能够通过超稳定理论来证明其渐近超稳定性, 任意时刻控制信号都有界.

定理 1 (超稳定性定理) 对于类似于 (10) 式描述的系统, 只要满足以下两个条件, 则系统是渐近超稳定的.

- 1) 传递 $T(sI - A_m)^{-1}B_1$ 函数, 为严格正实;
- 2) 对于任意时间区间 $[t_1, t_2]$ 波波夫积分 (Popov) 不等式成立. 即

$$\vartheta = \int_{t_1}^{t_2} v^T(\tau)\omega(\tau) d\tau \geq r_0^2,$$

r_0 为任意有限实数.

系统达到渐近超稳定后将有以下结果:

- 1) 广义误差 $e(t)$ 随着时间的推移能够趋于零, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_m(t)] = 0$;

- 2) 所有的控制信号 $e(t)$, $v(t)$, $\omega(t)$, $\hat{k}(t)$, $u(t)$ 都是有界的.

根据超稳定理论系统达到渐近超稳定后, 被控对象能够跟踪模型达到控制目的. 因此要证明所设计的自适应律的有效性即证明系统是否能够达到渐近超稳定, 则只需证明定理 1 中的两个条件是否满足. 下面证明本文所设计的自适应律能使控制系统达到渐近超稳定.

证明 要证明本文所提自适应律能使控制系统达到渐近超稳定则只需证明定理 1 中的两个条件即可. 由于 A_m 是 Hurwitz 矩阵, 矩阵 T 由 (13) 式求得, 则传递函数 $T(sI - A_m)^{-1}B_1$ 定为严格正实函数. 因此要证明渐近超稳定, 则只需证明波波夫不等式成立. 由 (7), (8) 式有

$$\begin{aligned} -v^T \omega &= v^T [B_1^{-1}(A - A_m)x + B_1^{-1}d \\ &\quad - B_1^{-1}B_m r] + v^T B_1^{-1} \phi(u) \\ &\leq \|v^T\| [\|B_1^{-1}(A - A_m)x\| + \|B_1^{-1}\| \|d\| \\ &\quad + \|B_1^{-1}B_m r\|] + v^T B_1^{-1} \phi(u) \\ &\leq \|v^T\| [\|B_1^{-1}(A - A_m)x\| + \|B_1^{-1}\| \|\eta(t)\| \\ &\quad + \|B_1^{-1}B_m r\|] + v^T B_1^{-1} \phi(u) \\ &= \|v^T\| [\|B_1^{-1}(A - A_m)x\| + \|B_1^{-1}B_m r\| \\ &\quad + k(t)] + v^T B_1^{-1} \phi(u). \end{aligned} \quad (17)$$

由不等式 (4) 和等式 (14) 有

$$\begin{aligned} u^T \phi(u) &= -\frac{v^T B_1^{-1}}{\|v^T\|} \varphi(x, t) \phi(u) \geq \delta_1 u^T u \\ &= \delta_1 \frac{v^T B_1^{-1}}{\|v^T\|} \varphi(x, t) \frac{(v^T B_1^{-1})^T}{\|v^T\|} \varphi(x, t) \\ &\geq \delta_1 \lambda \frac{[B_1^{-1}(B_1^{-1})^T] \|v^T\|^2}{\|v^T\|^2} \varphi(x, t)^2 \\ &= \delta_1 \lambda (B_1^{-1}(B_1^{-1})^T) \varphi(x, t)^2. \end{aligned} \quad (18)$$

可见,

$$v^T B_1^{-1} \phi(u) \leq -\delta_1 (B_1^{-1}(B_1^{-1})^T) \varphi(x, t) \|v\|. \quad (19)$$

由不等式 (19), (17) 有

$$\begin{aligned} -v^T \omega &\leq \|v^T\| [\|B_1^{-1}(A - A_m)x\| \\ &\quad + \|B_1^{-1}B_m r\| + k(t)] \\ &\quad - \delta_1 (B_1^{-1}(B_1^{-1})^T) \varphi(x, t) \|v\|. \end{aligned} \quad (20)$$

将 (15) 式代入 (20) 式, 整理得

$$-v^T \omega \leq \|v^T\| [k(t) - \hat{k}(t)]. \quad (21)$$

由 (16), (21) 式得

$$-v^T \omega \leq -\lambda \|v^T\| \int_{t_1}^{t_2} \|v^T\| d\tau. \quad (22)$$

对不等式 (22) 两端同时在时间区间 $[t_1, t_2]$ 上积分得

$$\begin{aligned} & \int_{t_1}^{t_2} v^T \omega d\tau \\ & \geq \int_{t_1}^{t_2} \|v^T\| \left(\lambda \int_{t_1}^{t_2} \|v^T\| d\tau \right) dt \geq -r_0^2. \end{aligned} \quad (23)$$

波波夫不等式得证. 故所设计的自适应算法能够使系统达到渐近超稳定, 即控制对象能够跟随参考模型.

3 多通道的自适应控制器的设计

3.1 基于 TLS-ESPRIT 技术的系统模式辨识

TLS-ESPRIT 算法是一种基于子空间的高分辨率信号分析方法, 其原理是将辨识信号分解成

噪声子空间和信号子空间, 利用其正交性来实现高分辨率的谱估计, 理论上具有无限小的频率分辨率, 与传统的 Prony 算法相比有更强的抗噪声能力, 适用于大系统小扰动下的振荡特性分析和模型辨识 [22-26].

四川电网向上直流送端孤岛运行时拓扑结构如图 1 所示. 在搭建电磁暂态模型时, 主要考虑 500 kV 线路, 对 220 kV 线路进行了等值处理. 孤岛运行时向上直流输送容量为 1600 MW, 福溪电厂、珙县电厂、泸州电厂各开 2 台发电机, 向左、向右水电厂各开 4 台发电机.

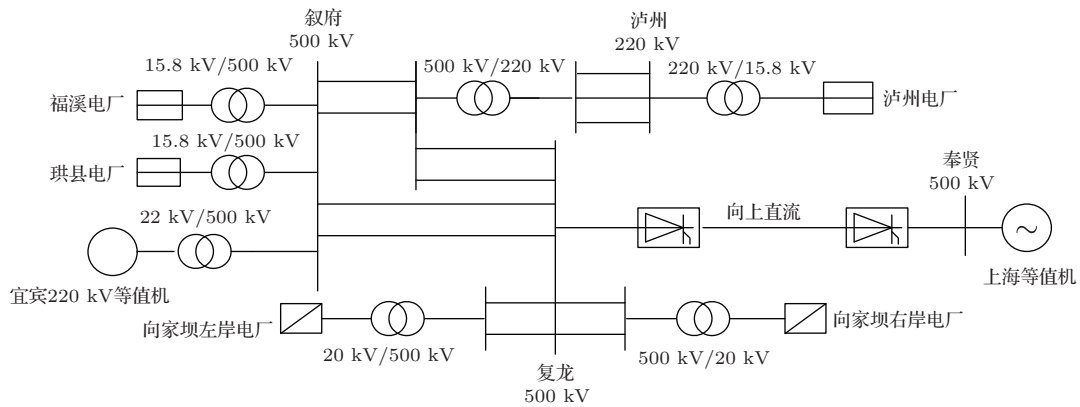


图 1 向上直流送端孤岛运行方式下系统的拓扑结构

利用机组作用系数 (UIF) 法评估向上直流在孤岛运行下对电网进行风险评估, 计算结果如表 1.

表 1 各电厂机组作用系数计算结果

序号	名称	出力/MW	UIF
1	福溪电厂	2 × 600	0.105
2	珙县电厂 (500 kV)	1 × 600	0.108
3	珙县电厂 (220 kV)	1 × 600	0.072
4	泸州电厂	2 × 600	0.066

由表 1 的结果可以看出, 福溪电厂、珙县电厂 (500 kV) 机组作用系数均超过 0.1, 相关电厂与向上直流作用较为紧密, 引发次同步振荡的风险较大. 利用 TLS-ESPRIT 对福溪电厂的振荡模式进行辨识, 由于电力系统维数非常高, 必须对辨识结果进行降阶处理, 保留体现系统振荡特性的主要零极点. 为了减小辨识误差, 待系统进入稳态后在向上直流送端定电流控制信号叠加一个小的阶跃信号, 观测信号选择福溪电厂的发电机转子角度差. 辨识得到的振荡模式如表 2 所示. 从表 2 可以看出, 振荡模式 SSO1, SSO2 阻尼几乎为零; LFO1, LFO2

属于弱阻尼.

表 2 振荡模式辨识结果

振荡模式	特征根	振荡频率/Hz	阻尼比/%
SSO1	-0.046 ± j84.18	13.4057	0.0546
SSO2	-0.06 ± j154	24.5299	0.0389
LFO1	-0.094 ± j4.63	0.7669	2.0203
LFO2	-0.056 ± j3.43	0.5462	1.6324

3.2 多通道直流附加自适应控制器的设计

在交直流互联系统中, 一般情况下通过直流附加控制为低频振荡或次同步振荡的某个振荡模式提供阻尼时, 可能会对其他振荡模式提供负阻尼甚至可能激发新的振荡模式. 基于此, 本文利用对观测信号加置带通滤波器将振荡模式分解到不同的通道, 然后分别设计控制器以减小振荡模式间的相互影响. 将振荡模式分解到不同通道后, 利用 TLS-ESPRIT 技术对每个振荡模式分别进行降阶辨识, 可获得每个振荡模式的传递函数, 这样便可以分别进行自适应控制器的设计. 为简化设计过程, 控制器的参考模型对辨识得到的传递函数进行

零极点配置而得到; 振荡模式 LFO1, LFO2属于低频振荡模式, 为控制器设计方便低频振荡模式取名

为LFO. 其控制器结构如图2所示, 图中的带通滤波器采用巴特沃兹 (Butterworth) 滤波器.

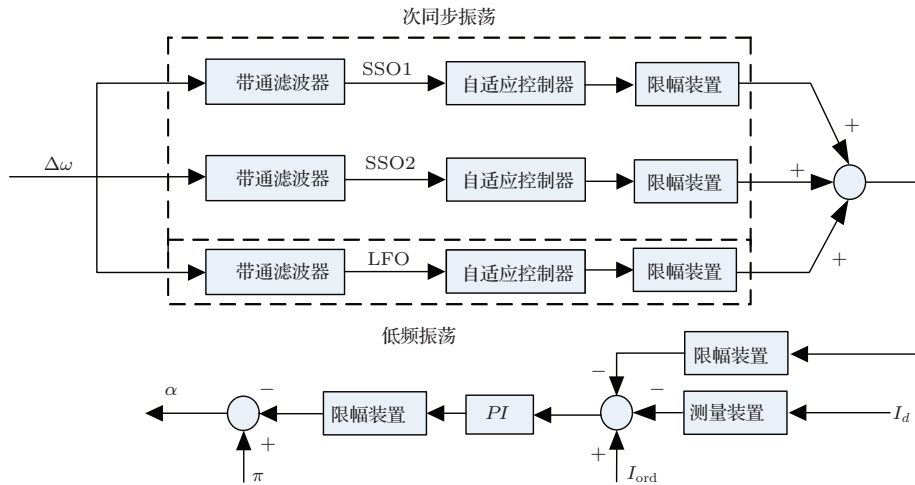


图2 多通道自适应控制附加控制器

4 仿真分析

为验证所提控制方法的有效性, 本文设置不同的故障和运行方式, 在电磁暂态仿真软件P-SCAD/EMTDC中仿真验证.

4.1 多通道自适应控制阻尼效果验证

向上直流孤岛运行方式, 单极运行方式输送功率将至额定功率 25%, 输送容量为 1600 MW, 福溪电厂、珙县电厂、泸州电厂各开 2 台发电机, 向左、向右水电厂各开 4 台发电机. 系统运行稳定后, 向上直流系统输送功率在第 1 s 下降 0.05 p.u. (标么值) (基准容量 6400 MW, 下同), 福溪电厂 1 号机转子角速度发生振荡. 不考虑系统信号传输时滞, 仿真结果如图 3 所示.

从仿真结果来看, 采用多通道的控制策略能够适时有效地提高系统阻尼, 同时较好地抑制了低频振荡和次同步振荡. 可以看出本文采用的多通道自适应控制策略比传统 PID 控制效果更好.

4.2 鲁棒性验证

向上直流在孤岛运行方式下, 针对不同故障, 验证本文所提方法的控制效果, 不考虑因信号传输引起的时滞. 故障设置为: 珙县 1 号机 (500 kV) 升压变 500 kV 侧发生 0.05 s 三相接地短路故障; 泸州 220 kV 母线发生 0.05 s 三相接地短路故障; 叙府

500 kV 母线发生 0.05 s 三相接地短路故障. 控制效果如图 4—6 所示. 改变直流运行方式, 单极输送运行功率提升至 0.5 p.u. (3200 MW), 叙府 500 kV 母线发生 0.05 s 三相接地短路故障, 仿真结果如图 7 所示.

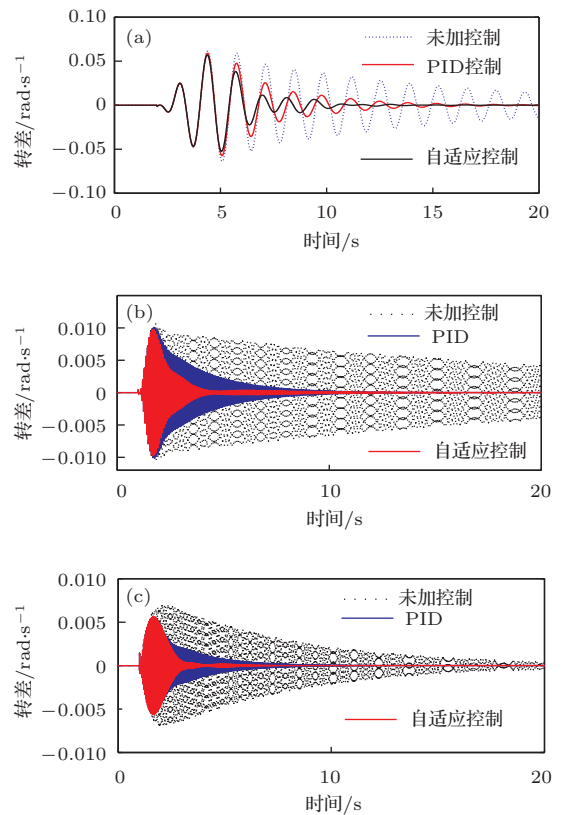


图3 (网刊彩色) 向上直流功率第 1 s 下降 0.05 p.u. (a) 低频振荡发电机转子转速差; (b) 次同步振荡 SSO1 振荡模式; (c) 次同步振荡 SSO2 振荡模式

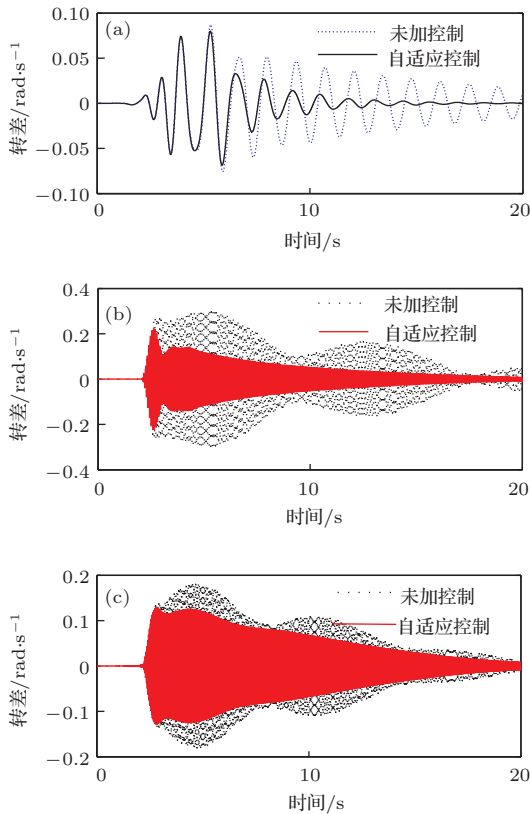


图4 (网刊彩色) 珙县一号机(500 kV)三相短路故障 (a) 低频振荡模式发电机转子转速差; (b) 次同步振荡 SSO1 振荡模式; (c) 次同步振荡 SSO2 振荡模式

从仿真结果来看, 本文所提出的多通道自适应控制能够在不同的故障条件、不同的系统运行方式下均能有效地抑制次同步振荡和低频振荡, 具有较好的鲁棒性。此外, 珙县一号机(500 kV)、泸州 220 kV 三相故障时产生了新的低频振荡模式(如图4和图5所示), 本文所提的控制策略对这些新的振荡模式也能够较好地抑制。从图6和图7可以看

出, 采用本文所提控制在故障发生后直流系统触发角很快趋于稳定, 这有利于直流系统的直流电压稳定和整个系统的功率平衡。

4.3 考虑系统时滞控制器性能校验

系统的广域信号在采集和传输过程中必定存在时滞, 时滞的大小依赖于网络的通信条件, 通信时滞为数毫秒到数十毫秒不等, 因此通信时滞是全部系统时滞的主要组成部分, 有必要对不同的时滞

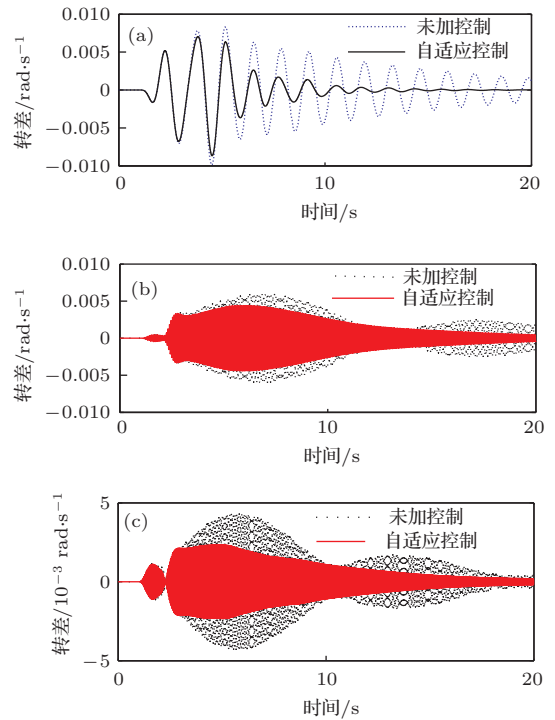


图5 (网刊彩色) 泸州 220 kV 发生三相接地短路故障 (a) 低频振荡模式发电机转子转速差; (b) 次同步振荡 SSO1 振荡模式; (c) 次同步振荡 SSO2 振荡模式

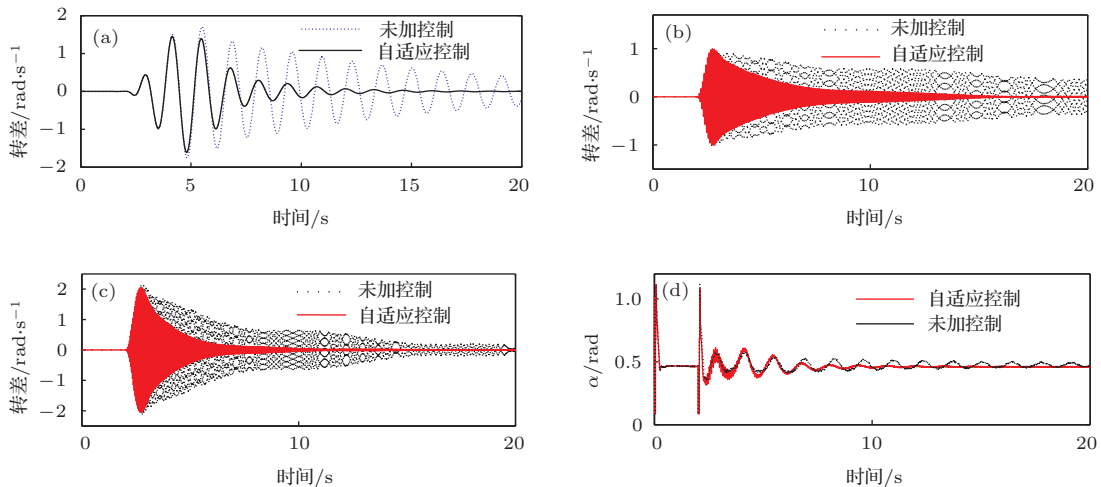


图6 (网刊彩色) 叙府 500 kV 母线三相接地短路故障 (a) 低频振荡模式发电机转子转速差; (b) 次同步振荡 SSO1 振荡模式; (c) 次同步振荡 SSO2 振荡模式; (d) 向上直流送端触发角

情况下对控制器性能进行验证. 孤岛运行方式、输送功率 25% (1600 MW) 时, 叙府 500 kV 母线发生 0.05 s 三相接地短路故障. 设从福溪电厂信号采集传送到向上直流控制站整个过程中产生的时滞分别为 5, 10, 15 ms, 此时考察控制器的效果. 时滞用 Pade 环节近似代替 [27-30], 仿真结果如图 8 所示.

从仿真结果可以看出, 低频振荡模式对于较小的时滞不敏感, 即使时滞增加到 50 ms 时控制器仍具有较好的控制效果, 这是因为低频振荡的振荡频率很低, 产生的滞后相位较小. 同时从仿真结果可

以看出, 次同步振荡模式对于时滞很敏感, 原因是其振荡频率较大, 即使较小的时滞也能产生较大的滞后相位.

从实际系统角度来说, 系统中信号传输必定会引起时滞, 并且可能根据网络情况不同引起随机时滞. 对于这种情况, 可利用 WAMS 采样率高和同步时钟信号将随机时滞补成固定时滞, 对于固定时滞可对其相位补偿. 对于次同步振荡模式因时滞原因导致控制器相位滞后, 有必要对其进行相位补偿. 补偿方法如下:

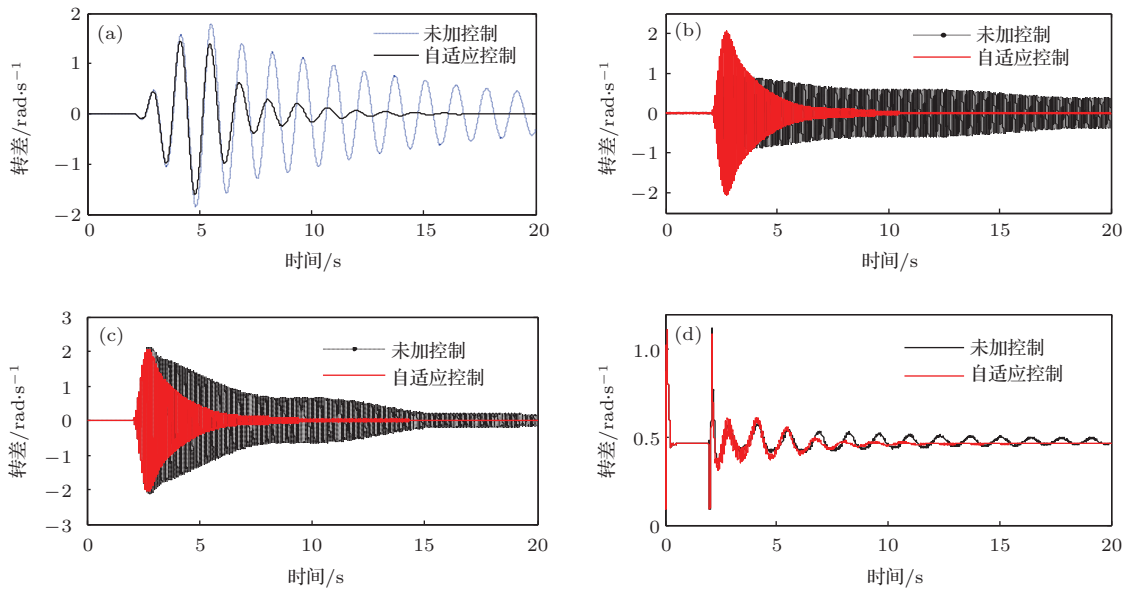


图 7 (网刊彩色) 直流功率提升后叙府 500 kV 母线三相接地短路故障 (a) 低频振荡模式发电机转子转速差; (b) 次同步振荡 SSO1 振荡模式; (c) 次同步振荡 SSO2 振荡模式; (d) 向上直流送端触发角

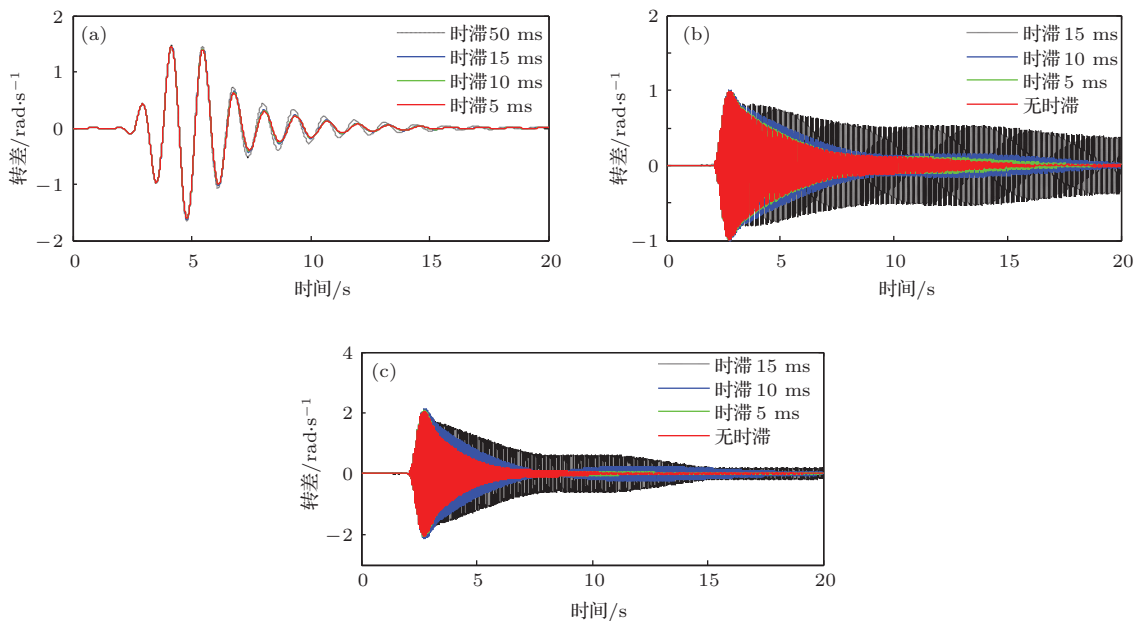


图 8 (网刊彩色) 考虑信号传输时滞时叙府 500 kV 母线 (a) 低频振荡模式发电机转子转速差; (b) 次同步振荡 SSO1 振荡模式; (c) 次同步振荡 SSO2 振荡模式三相接地短路故障

设相位补偿环节为 $H_c(s)$, 考虑时滞时系统的主导极点为 λ_0 , 时滞环节为 $e^{-\tau s}$, 则需补偿的相位为 $H_c(s) = e^{\lambda_0 s}$, 设补偿环节如下所示:

$$H_c(s) = K \frac{1 + \alpha s}{1 + \beta s}. \quad (24)$$

设系统的主导极点为 $\lambda_0 = \sigma_0 + j\omega_0$, 从辨识得到振荡模态看 σ_0 远远小于 ω_0 , 将其忽略, 可得

$$\begin{cases} \theta = \frac{1 - \sin \omega_0 \tau}{1 + \sin \omega_0 \tau} \\ \alpha = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{\theta}}, \beta = \alpha \theta \\ K = 1/|H_c(j\omega_0)| \end{cases} \quad (25)$$

仍考虑本小节所设置故障, 固定时滞设置为 15 ms, 采用 (25) 式进行相位补偿, 相位补偿后的仿真结果如图 9 所示. 从仿真结果来看, 相位补偿较好地解决了时滞问题, 取得了几乎和无时滞相同的控制效果.

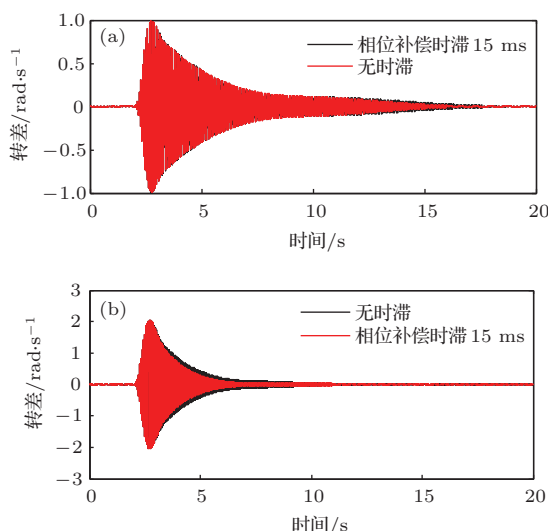


图9 (网刊彩色) 时滞补偿后的控制效果 (a) 次同步振荡 SSO1 振荡模态; (b) 次同步振荡 SSO2 振荡模态

5 结 论

交直流互联的电网复杂多变, 为电网的实际运行带来了较大的风险. 本文设计了一种自适应算法, 并用超稳定理论证明了其正确性, 基于 TLS-ESPRIT 辨识方法, 辨识出系统的振荡模态, 然后将其分解为多个通道, 利用该自适应控制算法对每个通道设计了控制器, 减小了各个振荡模态之间的影响. 在 PSCAD/EMTDC 中验证了所提控制方案的正确性. 与传统 PID 控制方案相比, 本文方案具有更好的控制性能, 对于不同的故障和运行方式具

有鲁棒性, 考虑系统时滞时不同的时滞对低频振荡模态抑制也具有较好的控制效果, 在较大时滞时进行相位补偿后对于次同步振荡模态抑制具有较好的控制效果. 这对于复杂的交直流互联系统控制系统的设计具有较好的参考价值.

参考文献

- [1] Li X Y 2010 *HVDC Transmission System* (1st Ed.) (Beijing: Science Press) pp1-9 (in Chinese) [李兴源 2010 高压直流输电系统 (第一版) (北京: 科学出版社) 第1—9页]
- [2] Zhao R, Li X Y, Liu T Q, Li K 2014 *Electr. Power Automat. Equip.* **33** 1 (in Chinese) [赵睿, 李兴源, 刘天琪, 李宽 2014 电力自动化设备 **33** 1]
- [3] Song D W, Yang X T, Ding Q L, Ma S Y, Li B Q, Wang Q 2011 *Power Syst. Technol.* **35** 22 (in Chinese) [宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 马世英, 李柏青, 王青 2011 电网技术 **35** 22]
- [4] Wang H F, Swift F J, Li M 1997 *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings IET* **144** 155
- [5] J Y Zhang, Y Z Sun 2005 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition Asia and Pacific Dalian, China, July 9-12, 2005* p1
- [6] China Southern Power Grid Power Dispatch Communications Center 2008 *China Southern Power Grid Operation Mode in 2008* (in Chinese) [中国南方电网有限公司 2008 中国南方电网 2008 年运行方式]
- [7] Kundur P 1994 *Power System Stability and Control* (1st Ed.) (New York: McGraw-Hill) pp332-333
- [8] Tang N, Xiao X N, Li W, Gao B F, Zheng R 2011 *High Voltage Engineer.* **37** 1051 (in Chinese) [唐酿, 肖湘宁, 李伟, 高本锋, 郑蕤 2011 高电压技术 **37** 1051]
- [9] Ni Y X, Wang Y C, Chen S S, Zhang B L 1993 *Proc. CSEE* **13** 62 (in Chinese) [倪以信, 王艳春, 陈寿孙, 张宝霖 1993 中国电机工程学报 **13** 62]
- [10] Hu N, Li X Y, Li K, Qin B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 068401 (in Chinese) [胡楠, 李兴源, 李宽, 覃波 2014 物理学报 **63** 068401]
- [11] Praveen T, Srivastava S C, Singh S N 2011 *IEEE Trans. Power Syst.* **26** 719
- [12] Li B H, Zhang Y M, Li X Y, Liu T Q, Zhao R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 098801 (in Chinese) [李保宏, 张英敏, 李兴源, 刘天琪, 赵睿 2014 物理学报 **63** 098801]
- [13] Weng H, Xu Z 2013 *Electr. Power Syst. Res.* **95** 38
- [14] Azad S P, Iravani R, Tate J E 2013 *Power Systems, IEEE Transactions on* **28** 3174
- [15] Tong S C, Li Y M 2010 *Sci. China: Informat. Sci.* **53** 307
- [16] Zhou J, Wu X J, Liu Z R 2014 *Sci. China: Technol. Sci.* **57** 905
- [17] Li N, Yuan H Q, Sun H Y, Zhang Q L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 030508
- [18] Hu Y H, Zhao S Q, Ma Y F, Huang C S 2004 *Electr. Power Automat. Equip.* **24** 15 (in Chinese) [胡云花, 赵书强, 马燕峰, 黄常抒 2004 电力自动化设备 **24** 15]

- [19] Zhou K, Doyle J C, Glover K 1996 *Robust and Optimal Control* (1st Ed) (New Jersey: Prentice Hall) pp233–235
- [20] Liu Y T, Chang K M, Li W Z 2010 *Precision Engineering* **34** 62
- [21] Croft D, Devasia S 1998 *J. Guidance, Control, and Dynamics* **21** 710
- [22] Tripathy P, Srivastava S C, Singh S N 2011 *IEEE Trans. Power Syst.* **26** 719
- [23] Wang X, Li X Y, Wang Y H, Zhao R 2012 *Power System Protection and Control* **40** 121 (in Chinese) [王曦, 李兴源, 王渝红, 赵睿 2012 电力系统保护与控制 **40** 121]
- [24] Xu X L, Lin T, Zhang F, Zhang Q 2012 *Power System Technol.* **36** 109 (in Chinese) [徐遐龄, 林涛, 张帆, 张强 2012 电网技术 **36** 109]
- [25] Tripathy P, Srivastava S C, Singh S N 2011 *IEEE Trans. Power Syst.* **26** 719
- [26] Zhang J, Xu Z, Wang F, Chang Y 2007 *Automat. Electr. Power Syst.* **31** 84 (in Chinese) [张静, 徐政, 王峰, 常勇 2007 电力系统自动化 **31** 84]
- [27] Kharitonov V L, Zhabko A P 2003 *Automatica* **39** 15
- [28] Youcef Toumi K, Ito O 1990 *J. Dyn. Syst. Measur. Control* **11** 133
- [29] Tan W, Marquez H J 2003 *Chen J. Process Control* **13** 203
- [30] Silva G J, Datta A, Bhattacharyya S P 2001 *Proceedings of the 40th IEEE Conference* IEEE Orlando, FL September 7–9, 2001 p4733

Multi-channel wide area adaptive damping control for suppressing low-frequency and sub-synchronous oscillation*

Zeng Guo^{1)†} Li Xing-Yuan¹⁾ Liu Tian-Qi¹⁾ Zhao Rui²⁾

1) (School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

2) (Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

(Received 26 May 2014; revised manuscript received 29 June 2014)

Abstract

A model reference adaptive control scheme is developed based on hyper-stability theory and is proved. Both of reduced order models of the power system and relevant oscillation frequencies are acquired by TLS-ESPRIT algorithm. The band-pass filters (Butterworth) are utilized to decompose oscillation frequencies into different channels and controllers are designed for each oscillation mode based on adaptive control method, thus reducing the influences of the various controllers. Xiangjiaba-Shanghai DC link under island operation condition is simulated using electromagnetic transient program PSCAD/EMTDC to demonstrate proposed control strategy. The results validate that the proposed method is able to suppress low-frequency oscillation and sub-synchronous oscillation simultaneously and the proposed method has better control performance than the traditional PID control. The problem will lead to controller performance deterioration caused signal transmission delay in system and it is resolved by phase compensation.

Keywords: hyperstable theory, system identification, oscillations, adaptive damping control

PACS: 88.80.hj, 84.70. + p, 02.30.Yy

DOI: 10.7498/aps.63.228801

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51037003), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA05A119).

† Corresponding author. E-mail: garfieldl236@163.com