

DOI: 10.7667/PSPC161341

一种基于协同控制的 SVC 新型非线性控制器

邹延生, 董萍

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为提高含静止无功补偿器(static var compensator, SVC)电力系统的功角稳定性和电压稳定性, 针对电力系统的非线性和建模不准确性, 提出一种基于协同控制理论的 SVC 新型非线性控制器(SVC nonlinear controller based on synergetic control, SNC)。首先设计考虑电压稳定和功角稳定的宏变量和流形, 接着推导出基于协同控制的静止无功补偿器的控制解析表达式, 并探讨各控制参数的选取原则。最后将所设计的 SNC 应用于四机两区域系统和 IEEE9 节点系统, 采用 PSCAD/EMTDC 仿真验证。与传统 SVC 附加控制器(SVC conventional supplementary controller, CSC)相比, 所提 SNC 在给系统提供阻尼的同时, 能够更为快速地使电压回归稳定。

关键词: SVC; 协同控制; 非线性; 功角稳定; 电压稳定

Design of an innovative SVC nonlinear controller based on synergetic control

ZOU Yansheng, DONG Ping

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to improve the power angle stability and voltage stability of power system that contains static var compensator (SVC), this paper puts forward a SVC nonlinear controller (SNC) based on synergetic control theory. The macro variables and manifold are designed considering the voltage stability and power angle stability, then the analytical expression of the control of static var compensator based on synergetic control is derived, and the determination principle of each control parameter is discussed. The designed SNC is applied to a two-area system and IEEE9 node system, which is verified by PSCAD/EMTDC simulation. Compared with the SVC conventional supplementary controller (CSC), the proposed SNC in this paper is more effective to stabilize the voltage of the system while providing damping to the system.

This work is supported by Key Research Funds for the Central Universities (No. 2015ZZ017) and National Natural Science Foundation of China (No. 51107042).

Key words: SVC; synergetic control; nonlinearity; power angle stability; voltage stability

0 引言

随着电力系统规模的日益庞大, 为提高系统稳定性, 越来越多的电网采用了柔性交流输电技术^[1-2] (Flexible AC Transmission Systems, FACTS), 该技术具有快速响应的优良特性^[1, 3], 能够迅速改变电力系统中某特定点的电压、相角、阻抗。SVC 作为一种 FACTS 装置, 已经被广泛地应用于电力系统中, 不仅可以提高电压稳定性, 而且可以设计合适的附加控制器提高系统阻尼以抑制功角振荡^[4]。传统的 SVC 附加阻尼控制器的设计方法有相角补偿法^[5]、

测试信号法^[6]、留数法^[7]、极点配置法^[8], 以上方法都是运行点附近线性化的方法, 当系统偏离了设计的运行点时, 控制性能将会受到影响。文献[9]采用直接反馈线性化理论在一个单机无穷大系统中推导出 SVC 附加阻尼非线性控制器, 但这种方法严重依赖于系统的精确模型和参数, 应对模型和参数不准确性方面略显不足。文献[10]采用滑模控制来设计 SVC 附加阻尼非线性控制器, 但是由于滑模控制本身存在抖振问题, 有可能会对其应用到 SVC 阻尼控制的性能造成影响。以上 SVC 附加控制器的设计都考虑了对系统振荡的抑制, 但是均未考虑在给系统提供阻尼的同时最快速度地恢复电压稳定性。

在应对系统的模型不精确性和非线性方面, 协同控制具有先天的优势, 它通过选择合适的宏变量

基金项目: 中央高校重点基金项目 (2015ZZ017); 国家自然科学基金项目 (51107042)

能够保证系统的全局稳定性, 对建模不准确性, 内部参数扰动具有良好的鲁棒性^[11]。目前在电力系统中的应用有利用协同控制的直流输电非线性定电压, 定电流控制^[12], 电力系统稳定器的控制^[13-14], 发电机非线性励磁控制^[15], 结果表明协同控制理论的应用使得以上控制取得较为理想的控制效果。本文利用广域测量技术的测量信息, 采用协同控制理论设计了一种非线性 SVC 控制器。首先根据协同控制理论, 设计了同时考虑系统阻尼和电压稳定性的宏变量, 推导出 SVC 附加控制器的解析表达式, 并采用李亚普诺夫定理证明了该控制器的稳定性, 然后探讨了各控制参数的选取原则, 最后在四机两区域系统和 IEEE9 节点系统采用 PSCAD/EMTDC 搭建详细模型, 分别验证了其对不同故障位置和时滞的鲁棒性, 并与传统的 SVC 附加控制器对比验证其有效性和优越性。

1 系统模型

1.1 惯量中心模型

对于一个含 n 台发电机的区域, 定义惯量中心等值转子角 δ_{COI} 和等值角速度 w_{COI} 为

$$\begin{cases} \delta_{\text{COI}} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \\ w_{\text{COI}} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i w_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, M_T 为区域内 n 台发电机的惯性时间常数之和, 即

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (2)$$

1.2 SVC 模型

研究 SVC 的稳定控制时, 可以把 SVC 视为一阶惯性环节^[16], 即 SVC 的动态调节方程为

$$\begin{cases} \dot{B}_{\text{svc}} = \frac{1}{T_{\text{svc}}} (B_{\text{svcref}} - B_{\text{svc}} + k_{\text{svc}} u_{\text{svc}}) \\ T_{\text{svc, min}} \leq T_d \leq T_{\text{svc, max}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: B_{svc} 为 SVC 的实际电纳; B_{svcref} 为 SVC 的电纳参考值; u_{svc} 为 SVC 附加控制变量; k_{svc} 为 SVC 调节器的增益系数; T_{svc} 为 SVC 的惯性时间常数, 是一个不确定量, 其取值范围通常为 40~80 ms, 一般 T_{svc} 采用其参数估计值^[10], $T_{\text{svc}} = \sqrt{T_{\text{svc, min}} T_{\text{svc, max}}}$ 。

2 SVC 附加阻尼控制方案

2.1 协同控制理论

协同控制理论的基础是协同学和现代数学, 它

是一种状态空间的非线性控制理论^[17]。协同控制的关键是定义一个包含系统状态变量的控制流形, 该流形就是所设计控制器的控制目标, 系统最终将沿着该流形趋向平衡状态。协同控制器的设计首先是根据系统的特性设计宏变量, 然后根据流形收敛方程和系统状态空间模型求解控制规律。

对于一个 n 维的非线性系统

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (4)$$

式中: x 为系统状态变量; u 为控制变量; $f(\cdot)$ 为非线性函数。根据控制目标设计宏变量:

$$\psi(t) = \psi(x, t) \quad (5)$$

系统的收敛流形定义为

$$\psi(x, t) = 0 \quad (6)$$

对系统进行控制的最终目的是使系统从任意初始状态收敛到流形方程(6), 从而使系统稳定, 故流形的定义必须能够表征系统的稳态情况。使系统收敛到流形的动态方程定义为

$$T\dot{\psi} + \psi = 0, T > 0 \quad (7)$$

式中, T 为设计参数, 是一个表征系统从初始状态收敛到流形的时间常数。由于宏变量是状态变量的函数, 故对式(6)求导可得

$$\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dx} \dot{x} \quad (8)$$

代入式(7)可得

$$T \frac{d\psi}{dx} f(x, u, t) + \psi = 0 \quad (9)$$

由于引入了流形收敛方程(7), 使得系统进行了降阶处理, 因此求解式(9)可得到控制变量 u 的解析解, 使系统达到预期的控制性能。

2.2 控制方案的设计

一个典型的两区域含 SVC 系统如图 1 所示, 为了提供电压支撑, 通常 SVC 安装于联络线中点位置。

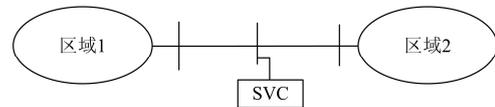


图 1 含 SVC 的两区域互联系统模型

Fig. 1 Two-area power interconnected system model with SVC

本文设计 SVC 非线性控制器的目标是不仅阻尼系统区间振荡, 而且能使 SVC 尽快地恢复对电压的稳定支撑。该控制目标可以体现在宏变量的设计上, 首先考虑到 SVC 的一个主要作用是提供电压支撑, 确保电压稳定, 可以将 SVC 安装点的电压与基准值之差作为一个设计宏变量的状态变量, 其次本文所设计 SVC 新型控制器需要抑制区间功率振荡, 两区域互联系统振荡失稳时, 功率振荡的重要表征

量之一是两区域惯量中心的角频率之差, 因此将其作为设计宏变量的一个状态变量, 再者, 平衡状态时 SVC 的输出导纳是一个稳态值, 可将该 SVC 的导纳值与稳态值之差作为一个宏变量的状态变量。由此可以将以上状态变量进行线性组合构成宏变量。

$$\psi = B_{\text{svc}} - B_{\text{svc}0} + k_1 w_{12} + k_2 (V - V_0) \quad (10)$$

式中: B_{svc} , $B_{\text{svc}0}$ 分别为 SVC 实际提供导纳和平衡状态导纳值; V , V_0 分别为 SVC 安装点的电压和电压基准值; k_1 , k_2 分别为设计参数; w_{12} 为区域 1 与区域 2 惯量中心角频率偏差, 即

$$w_{12} = w_{\text{COI},1} - w_{\text{COI},2} \quad (11)$$

基于协同控制的 SVC 非线性控制就是要使系统从任意状态逐渐收敛到流形。

$$\psi = B_{\text{svc}} - B_{\text{svc}0} + k_1 w_{12} + k_2 (V - V_0) = 0 \quad (12)$$

系统的平衡点 $(B_{\text{svc}}, w_{12}, V) = (B_{\text{svc}0}, 0, V_0)$ 位于该流形所在平面, 系统从失稳状态回归到稳定状态就是收敛到流形, 并逐渐收敛到平衡点的过程。对式(10)求导可得

$$\dot{\psi} = \dot{B}_{\text{svc}} + k_1 \dot{w}_{12} + k_2 \dot{V} \quad (13)$$

将式(13)代入流行收敛方程式(7)可得

$$\dot{B}_{\text{svc}} = -\frac{1}{T} [B_{\text{svc}} - B_{\text{svc}0} + k_1 w_{12} + k_2 (V - V_0)] - k_1 \dot{w}_{12} - k_2 \dot{V} \quad (14)$$

将式(14)与 SVC 动态调节方程式(3)联立可得 SVC 非线性控制的解析表达式。

$$u = \frac{T_{\text{svc}}}{k_{\text{svc}}} \left\{ -\frac{1}{T} [B_{\text{svc}} - B_{\text{svc}0} + k_1 w_{12} + k_2 (V - V_0)] - k_1 \dot{w}_{12} - k_2 \dot{V} \right\} + \frac{1}{k_{\text{svc}}} (B_{\text{svc}} - B_{\text{svcref}}) \quad (15)$$

从 SVC 非线性控制器的设计过程中可以看出, 推导直接利用系统的非线性, 没有对系统进行线性化处理, 由于协同控制具有自组织性, 直接将控制规则嵌入到系统模型中^[18], 因此能够在系统发生扰动后依据所设计的控制方法自组织地使系统收敛到流形并回归稳定运行状态。

下面证明该控制器的稳定性。构造 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \psi^2 \quad (16)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \psi \dot{\psi} = \\ &= \psi (\dot{B}_{\text{svc}} + k_1 \dot{w}_{12} + k_2 \dot{V}) = \\ &= \psi \left[\frac{1}{T_{\text{svc}}} (B_{\text{svcref}} - B_{\text{svc}} + u_{\text{svc}}) + k_1 \dot{w}_{12} + k_2 \dot{V} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

将式(15)代入式(17)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \psi \left\{ -\frac{1}{T} [B_{\text{svc}} - B_{\text{svc}0} + k_1 w_{12} + k_2 (V - V_0)] \right\} = \\ &= -\frac{1}{T} \psi^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

故在本文所设计的控制器作用下能够使系统稳定。

2.3 控制方案的实施

本文所提的 SVC 的输入信号有 SVC 安装点的电压, SVC 实际产生的电纳和从 WAMS 系统取得的区域惯量中心的角频率。其中 SVC 实际产生的电纳可由式(19)算出。

$$B_{\text{svc}} = \frac{Q}{V^2} \quad (19)$$

式中: Q 为 SVC 实际发出的无功功率; V 为 SVC 安装点的电压。输入量 w_{12} 和 V 的微分环节可以采用式(20)、式(21)进行确定。

$$\dot{w}_{12} = \frac{w_{12}(t) - w_{12}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (20)$$

$$\dot{V} = \frac{V(t) - V(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (21)$$

式中, Δt 为测量信号的采样步长。

控制规律中包含 3 个设计参数: 系统收敛到流形的时间常数 T , 区域惯量中心角频率偏差系数 k_1 , SVC 安装点电压偏差系数 k_2 。其中 T 值是一个表征系统收敛到流形的时间常数, 其设定一般要小于系统的动态响应时间; k_1 值反映了宏变量中区域惯量中心转速偏差所占权重的大小, 表征对抑制系统区间功率振荡的作用。如式(12)所示, B_{svc} 和 V 保持不变时, 增大 k_1 的值将有利于减小惯量中心转速偏差, 有利于阻尼区间振荡; k_2 值表征宏变量中 SVC 安装点电压偏差的权重, 可以根据实际中与 SVC 发出导纳导纳偏差值之间的大小来设定一个合适的值。SVC 非线性控制器的控制框图如图 2 所示。

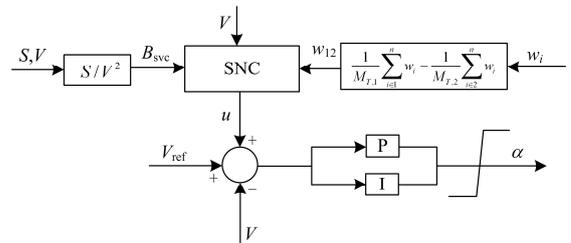


图 2 SVC 非线性控制器框图

Fig. 2 Block diagram of SVC nonlinear controller

3 算例仿真

为了验证本文所提 SVC 非线性控制器对阻尼

区间振荡的同时尽快恢复电压支撑的有效性, 采用 PSCAD/EMTDC 分别搭建四机两区域系统和 IEEE 9 节点系统进行仿真验证, 并采用传统的基于相角补偿法的超前滞后补偿附加控制器进行对比。

3.1 四机两区域系统

含 SVC 的两区域互联系统单线图如图 3 所示, 系统参数取自文献[8], 发电机模型采用 6 阶模型, SVC 采用详细电磁暂态模型, 为了比较直观地模拟系统振荡失稳现象, 各发电机均未装设电力系统稳定器。考虑到实际中信号测量会有延时, 系统中存在谐波以及干扰信号的影响, 采用图 4 所示实极点环节模拟测量信号的延时, 并对测量所得的 SVC 发出无功以及安装点电压下进行滤波处理, 其时间常数设为 0.02 s。

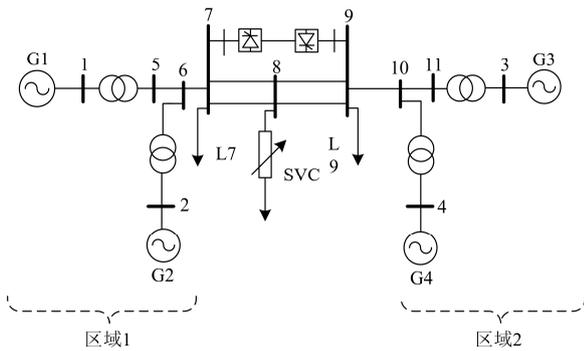


图 3 含 SVC 两区域互联系统图

Fig. 3 Two-area interconnected system with SVC

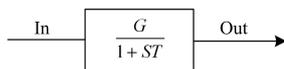


图 4 实极点环节

Fig. 4 Real pole link

为了验证本文所提 SVC 非线性控制器的有效性, 取文献[19]中采用相角补偿方法的 SVC 传统附加控制器 (SVC Conventional Supplementary Controller, CSC) 做对比, 传统 SVC 附加控制的输入信号为两区域惯量中心角频率偏差, 其控制规律如式(22)所示。

$$u = \frac{5s}{1+5s} \times 400 \left(\frac{1+0.03s}{1+0.02s} \right)^3 w_{12} \quad (22)$$

在本算例中本文所提 SNC 的控制参数为: $k_1=-5400$, $k_2=1$, $T=0.01$ 。故障设置为 1 s 时母线 7 发生三相金属性接地短路故障, 100 ms 后切除该故障, SVC 没有附加控制的情况下仿真结果如图 5 所示, 可以看到两区域间发电机的功角振荡逐渐增大, 系统在发生故障后逐渐失稳, 存在一个负阻尼的区

间振荡模式, 说明 SVC 在这里不能给系统提供足够的阻尼。采用线性化方法 SVC 传统附加控制(CSC)和本文所提 SVC 非线性控制(SNC)的仿真结果如图 6 所示, 从图 6(a)中可以看出, 在稳态情况下 SVC 为了能够动态调节电压留有一定的裕量, 因此可以利用其调节电压时附加一个调制信号, 使其具有一定的阻尼, 进而抑制系统故障后的功率振荡。从图 6(a)—图 6(d)中可以看出, 当采用 SNC 和 CSC 控制时, 系统在故障后具备一定的阻尼, 能够逐渐恢复稳定。从图 6(c)区间惯量中心角频率偏差曲线图和图 6(d)发电机 1 相对于发电机 3 功角曲线图中可以看出, 当采用本文所设计 SNC 时, 系统在故障发生后 19 s 就可回归稳定运行状态, 而采用 CSC 时, 系统故障后调节时间更长, 故障后 28 s 左右才使系统回归稳定, 验证了本文所提 SNC 对阻尼功率振荡的有效性。从图 6(b)SVC 安装点曲线可以看出, 相比于 CSC, 本文所提 SNC 能够更快地使 SVC 安装点电压回归稳定, 证明了本文所提 SNC 不仅能有效地抑制区间功率振荡, 也能更好地提高电压稳定性。

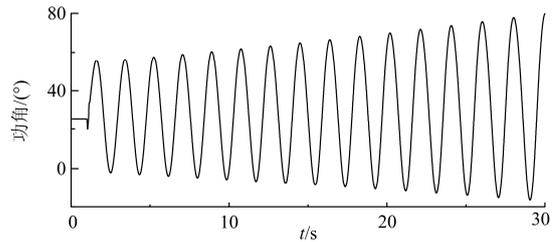
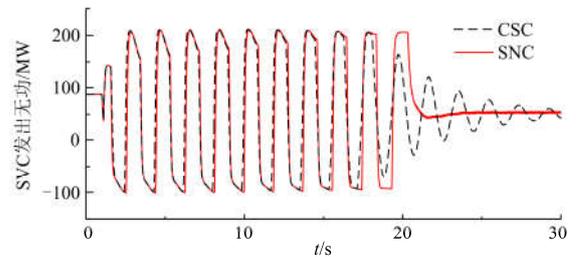


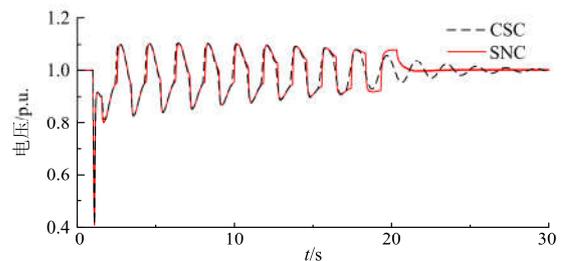
图 5 SVC 无附加控制时 G1 相对于 G3 功角曲线

Fig. 5 Power angle curve of the G1 relative to G3

without SVC additional control



(a) SVC发出无功功率曲线



(b) SVC安装点电压曲线

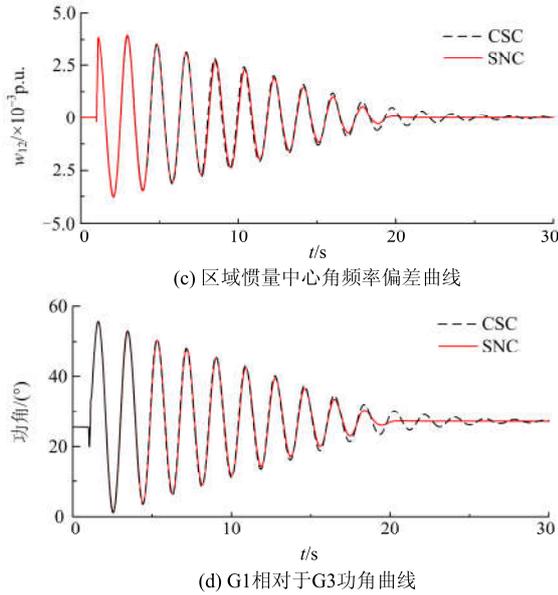


图 6 母线 7 发生三相接地短路时域仿真曲线
Fig. 6 Simulation curves of three-phase grounding short circuit on bus 7

图 7 是本文所设计宏变量的各分量在系统故障后的动态调节曲线图，可以看到，系统故障后各分量能够自组织地收敛到一个流行面上，然后在该面上逐渐收敛至原点，也就是系统的平衡状态，验证了协同控制应用于 SVC 控制器设计的自组织性和有效性。

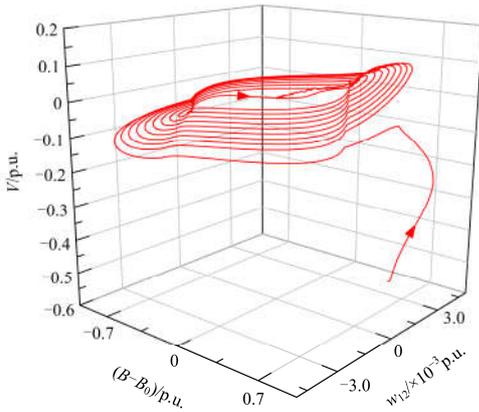


图 7 宏变量各分量轨迹图
Fig. 7 Trace of each component of the macro variables

3.2 鲁棒性校验

为了校验本文所提 SNC 的鲁棒性，对图 4 所示系统设置另一个故障：1 s 时，母线 9 发生三相接地短路故障，100 ms 后切除故障，与 CSC 对比的时域仿真结果如图 8 所示。图 8(a)可以看出，本文所提 SNC 在抑制区间功角振荡方面的调节速度比 CSC 快，能更快地使功角恢复稳定，图 8(b)可以看

出在该故障下本文所提 SNC 亦能够更快地使电压恢复稳定。验证了本文所提 SNC 在不同故障下的鲁棒性和有效性。

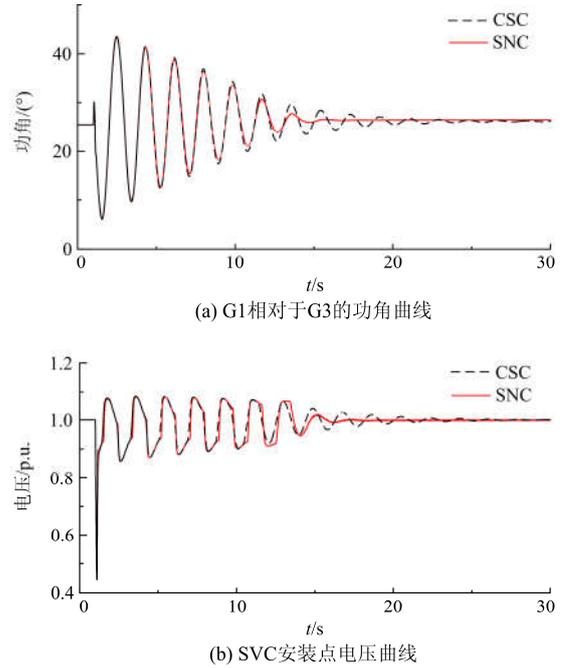
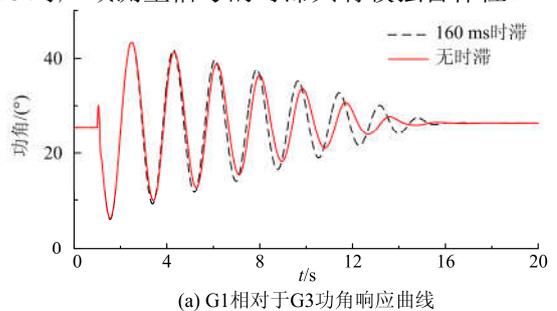
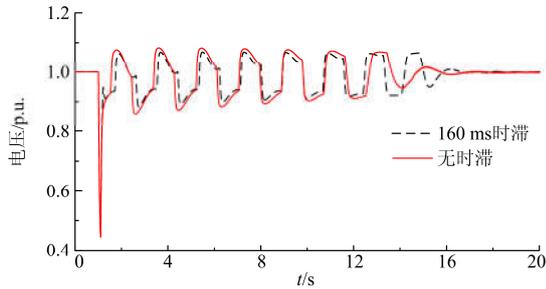


图 8 母线 9 发生三相接地短路时域仿真曲线
Fig. 8 Simulation curves of three-phase grounding short circuit on bus 9

WAMS 技术的发展使得采用广域测量信号作为输入信号成为可能^[20]，但是测量信号时滞是不得不考虑的一个问题^[21-25]，文献[26]表明在南方电网中考虑到广域通信时延、控制中央站的数据处理时延、PMU 的频率计算时延以及直流极控执行控制子站模拟量指令的时延，整个控制回路的时延约 110 ms。为了验证本文所提 SNC 在输入信号时滞情况下的鲁棒性，采用 PSCAD/EMTDC 中的 Delay function 模块来模拟广域采样信号时滞，设置 160 ms 的时滞，在同样的故障，仿真结果如图 9 所示，可以看到时滞对 SNC 的影响不大，发电机功角振荡和电压均能在故障后约 14 s 内稳定，验证了本文所提 SNC 对广域测量信号的时滞具有较强鲁棒性。



(a) G1 相对于 G3 功角响应曲线



(b) SVC安装点电压响应曲线

图 9 时滞下系统故障响应曲线

Fig. 9 Response curves of system under time delay

3.3 IEEE9 节点系统校验

IEEE9 节点系统单线图如图 10 所示, 其参数来自文献[27], 各发电机均未安装电力系统稳定器, SVC 安装在母线 5 上, 容量为 50 Mvar, 根据文献[27]对该系统的模态分析可知, 存在一个发电机 1 与发电机 2 和发电机 3 的主导振荡模式, 因此在 SNC 的设计过程中选择发电机 1 与发电机 2 和 3 的惯量中心角频率偏差作为输入信号。

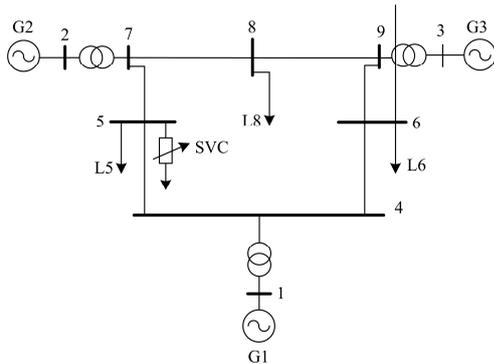
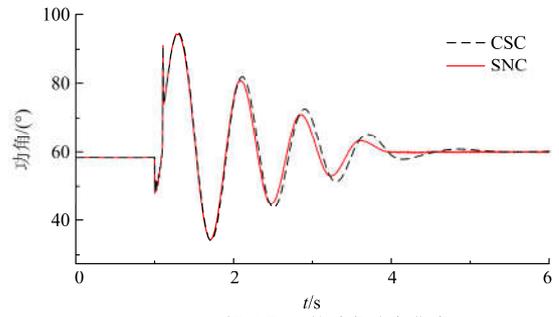


图 10 IEEE9 节点系统单线图

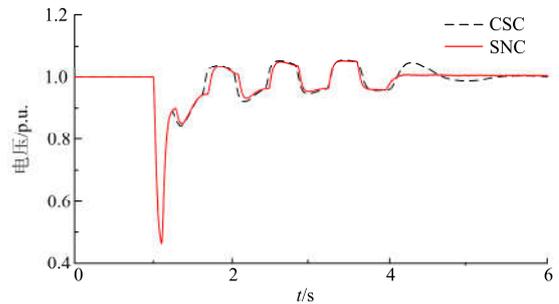
Fig. 10 Single line diagram of IEEE9 node system

仿真采用具有超前滞后补偿环节的 SVC 控制器做对比, 故障设置为 1 s 时母线 7 发生三相接地短路故障, 100 ms 后切除该故障, 仿真结果如图 11 所示。从图中可以看出, 无论是在功角稳定方面, 还是更快地使电压回归稳定方面, 相比于 CSC, 本文所提 SNC 均具有更短的调节时间, 能够更加迅速地使系统在故障后回归稳定。

进一步对不同故障点进行故障响应校验, 设置母线 3 在 1 s 时发生三相瞬时性接地短路故障, 100 ms 后该故障被切除, 故障响应曲线如图 12 所示。仿真结果表明, 选取不同故障点时, 本文所提 SNC 依然能够有效抑制功角振荡, 更快地使电压回归稳定, 验证了 SNC 对不同故障的鲁棒性, 对比仿真表明 SNC 相比于 CSC 在提升系统暂态稳定性方面具有较强的优越性。



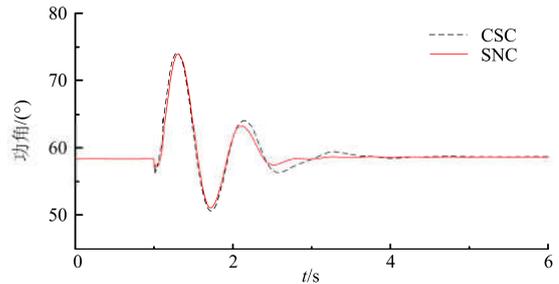
(a) G2相对于G1的功角响应曲线



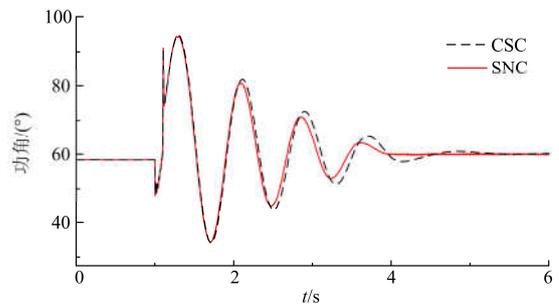
(b) 母线5电压响应曲线

图 11 母线 7 三相瞬时性短路故障响应曲线

Fig. 11 Response curves of three-phase instantaneous short-circuit fault on bus 7



(a) G2相对于G1功角响应曲线



(b) 母线5电压响应曲线

图 12 母线 3 三相瞬时性短路故障响应曲线

Fig. 12 Response curves of three-phase instantaneous short-circuit fault on bus 3

4 结论

本文基于协同控制理论设计了一种 SVC 新型

非线性控制器, 并在一个四机两区域系统和 IEEE9 节点系统中采用 PSCAD/EMTDC 仿真验证, 与传统线性化方法设计的 SVC 附加控制器相比, 具有以下优点。

1) 不仅能使故障后区间功角振荡得到更快地抑制, 而且兼顾到电压稳定, 使电压更快地恢复。

2) 控制器的设计过程中直接利用系统的非线性, 没有经过线性化处理, 因而在偏离平衡状态较远时相比线性化方法设计的控制器具有更好的控制效果。

3) 不需要求取系统复杂的传递函数, 且为固定参数控制器, 有利于实际工程应用。

参考文献

- [1] 张晶晶, 王政余, 丁明, 等. 并联储能型 FACTS 元件对连锁故障的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 90-96.
ZHANG Jingjing, WANG Zhengyu, DING Ming, et al. Influences of FACTS element with energy storage on cascading failures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 90-96.
- [2] 朱涛, 段荣华, 汪震. 不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网动态稳定水平的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 65-70.
ZHU Tao, DUAN Ronghua, WANG Zhen. Research on different types of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 65-70.
- [3] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 刘隽, 李兴源, 汤广福. SVC 电压控制与阻尼调节间的相互作用机理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 12-17.
LIU Jun, LI Xingyuan, TANG Guangfu. Interrelations between SVC voltage control and damping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 12-17.
- [5] 严伟佳, 蒋平. 抑制区域间低频振荡的 FACTS 阻尼控制[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 189-192.
YAN Weijia, JIANG Ping. Damping control with FACTS aiming at damping inter-area oscillation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 189-192.
- [6] 常勇, 徐政. SVC 广域辅助控制阻尼区域间低频振荡[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 40-46.
CHANG Yong, XU Zheng. SVC supplementary controller based on wide area signals to enhance damping of inter-area oscillation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(12): 40-46.
- [7] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑时滞影响的 SVC 广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 239-246.
YAO Wei, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Design of wide-area supplementary damping controller of SVC considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 239-246.
- [8] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-hill, 1994.
- [9] 马幼捷, 周雪松. 静止无功补偿器非线性控制对系统功角稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 84-88.
MA Youjie, ZHOU Xuesong. Study on nonlinear SVC control for improving power system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 84-88.
- [10] 王曦, 王渝红, 李兴源, 等. 考虑模型不确定性和时延的静止无功补偿器自适应滑膜控制器设计[J]. 物理学报, 2014, 63(23): 1-8.
WANG Xi, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Design of the static var compensator adaptive sliding mode controller considering model uncertainty and time-delay[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(23): 1-8.
- [11] KONDRATIEV I. Synergetic control[M]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2009.
- [12] 袁旭峰, 文劲宇, 周志成, 等. 协同控制及其在高压直流输电系统上的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 16-20.
YUAN Xufeng, WEN Jinyu, ZHOU Zhicheng, et al. Synergetic control and its application in a HVDC power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 16-20.
- [13] JIANG Zhenhua. Design of a nonlinear power system stabilizer using synergetic control theory[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(6): 855-862.
- [14] NECHADI E, HARMAS M N, HAMZAOU I A, et al. Type-2 fuzzy based adaptive synergetic power system control[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 88: 9-15.
- [15] ZHAO Ping, WEI Yao, WEN Jinyu, et al. Improved synergetic excitation control for transient stability enhancement and voltage regulation of power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 68: 44-51.
- [16] HINGORANI N G, GYUGYI L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems[M]. IEEE Press, 2000.
- [17] KOLESNIKOV A, VESELOV G, KOLESNIKOV A. Modern applied control theory: synergetic approach in control theory[J]. TRTU, Moscow, Taganrog, 2000.

- [18] KOLESNIKOV A, VESELOV G, POPOV A, et al. A synergetic approach to the modeling of power electronic systems[M]. New York: IEEE, 2000: 259-262.
- [19] 严伟佳, 蒋平, 顾伟. SVC 阻尼控制附加信号选取的探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 69-72.
YAN Weijia, JIANG Ping, GU Wei. Discussion on additional signal selection of SVC damping control[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(2): 69-72.
- [20] ZHAO Jinquan, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection & Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-11.
- [21] 关琳燕, 周洪, 胡文山. 基于 LMI 的广域时延多机电力系统的控制与稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 7-14.
GUAN Linyan, ZHOU Hong, HU Wenshan. Study on control and stabilization for multi-machine power system with wide-area time-delay by LMI[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 7-14.
- [22] 张建文, 王鹏, 王晗, 等. 多逆变器并联的均流控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 61-68.
ZHANG Jianwen, WANG Peng, WANG Han, et al. Average-current control strategy of multiple parallel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 61-68.
- [23] 姜卫东, 吴志清, 李王敏, 等. 电网不对称时抑制负序电流并网逆变器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 77-84.
JIANG Weidong, WU Zhiqing, LI Wangmin, et al. Control strategy of suppressing negative sequence current of grid-connected inverter base on asymmetric grid[J]. 2015, 30(16): 77-84.
- [24] 王宝安, 白晨阳, 陈豪, 等. 基于 CPS-SVPWM 调制的链式 STATCOM 直流侧电压控制策略[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 168-173.
WANG Baoan, BAI Chenyang, CHEN Hao, et al. Cascade-STATCOM DC voltage control strategy based on CPS-SVPWM modulation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 168-173.
- [25] 熊连松, 卓放, 刘小康. 增强型滑动平均滤波算法及其在畸变电网相位同步控制中的应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 13-23.
XIONG Liansong, ZHUO Fang, LIU Xiaokang. Enhanced moving average filter and its applications in phase locking control of distorted power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 13-23.
- [26] 李鹏, 吴小辰, 李立涅, 等. 南方电网广域阻尼控制系统及其运行分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 52-56, 101.
LI Peng, WU Xiaochen, LI Licheng, et al. Wide-area damping control system in China Southern Power Grid and its operation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 52-56, 101.
- [27] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

收稿日期: 2016-08-19; 修回日期: 2016-09-28

作者简介:

邹延生(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: zou2010@qq.com

董萍(1978-), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为 FACTS 技术及电力系统控制。E-mail: epdping@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)