

基于协同控制理论的非线性直流附加控制器设计

邹延生, 董 萍

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为提高高压直流联络线所连交流系统的暂态稳定性, 针对大规模交直流互联电网的非线性及其建模的不准确性, 设计了一种新型的基于协同控制的直流附加控制器并将其用于多区域交直流混联系统中。首先根据各区域惯量中心设计合适的宏变量和流形, 推导出基于协同控制直流附加控制器的解析表达式; 然后以区域惯量中心角频率偏差和直流功率偏差最小为目标函数, 采用遗传算法优化控制器参数; 最后将所设计的控制器分别用于两区域交直流并联系统和多馈入系统, 并采用 PSCAD 搭建详细模型进行时域仿真。仿真结果表明, 与基于极点配置线性化方法和基于滑模控制非线性方法的直流附加控制器相比, 提出的协同控制方法具有更好的控制效果, 能够有效地抑制区间功率振荡。此外, 该控制器的推导对系统模型的依赖性不强, 且对不同负荷模型、不同运行方式和广域测量信号的延时具有较强的鲁棒性。

关键词: 高压直流输电; 附加控制; 协同控制; 惯量中心; 暂态稳定性; 鲁棒性

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.032

0 引言

越来越多的区域电网采用交直流并联运行模式进行大规模互联, 使电网稳定性风险进一步增加。高压直流输电作为区域互联电网的重要组成部分, 可利用其快速可控性设计合理的附加控制器来提高电网的稳定性。传统的直流附加控制器的设计方法有相角补偿法、留数法^[1]、根轨迹法^[2]、Prony 辨识法^[3]、极点配置法^[4]等, 但基于这些方法设计的直流附加控制器是超前滞后补偿形式的, 这类控制器是线性控制器, 而电力系统本身是非线性系统, 在大干扰下系统偏离平衡点较远时, 这类控制器对于保持系统的稳定性具有不可避免的局限性。因此一些学者尝试将非线性控制技术引入直流功率附加控制中, 如非线性反馈线性化最优控制^[5-6]、滑模控制^[7]、自适应控制^[8]等。然而状态反馈线性化方法依赖系统的准确建模, 滑模控制容易带来抖振问题, 鲁棒控制和自适应控制不够精细时容易造成控制性能不稳定的现象。随着智能控制理论的发展和逐渐成熟, 一些智能控制也被引入直流功率附加控制器的设计中, 如模糊控制^[9]、神经网络控制^[10]、模糊神经网络控制^[11]等。这些控制理论被应用到直流输电附加控制器的设计中, 使得直流输电附加控制具有良好的鲁棒性, 然而这类附加控制器的设计依赖设计者的个人经验, 缺乏系统性和一致性的设计方法。

在应对系统非线性方面, 协同控制 SGC (Synergetic Control) 具有先天的优势, 其本身是非线性控制, 通过选择合适的宏变量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^[12]。SGC 在电力系统中的应用有电力系统稳定器的控制^[13]、发电机非线性励磁控制^[14-15]、DC-DC 变换器控制^[16-17], 结果表明 SGC 理论的应用使得以上控制取得较为理想的控制效果。

本文利用广域测量系统的测量信息, 采用 SGC 理论设计了一种非线性直流附加控制器。首先利用惯量中心推导出区域互联系统的模型, 然后根据 SGC 理论, 设计合适的流形, 推导出一种直流附加控制器的解析表达式, 并采用遗传算法优化控制器参数, 在两区域交直流并联系统和多馈入系统中验证了其有效性和优越性。

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, 第 i 台发电机的转子运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_0(\omega_i - 1) \\ \dot{\omega}_i = (P_{mi} - P_{ei})/M_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, δ_i 、 ω_i 、 ω_0 、 P_{mi} 、 P_{ei} 、 M_i 分别为第 i 台发电机的功角、角频率标幺值、基准角频率、机械功率、电磁功率、惯性时间常数。定义区域惯量中心等值转子角 δ_{col} 、惯量中心等值角速度 ω_{col} 为:

$$\begin{cases} \delta_{\text{col}} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \\ \omega_{\text{col}} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期: 2016-08-03; 修回日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107042); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228205); 中央高校基本科研业务费资助项目(2015ZZ017)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51107042), the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228205) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015ZZ017)

其中, M_T 为区域内 n 台发电机的惯性时间常数之和。由式(1)和式(2)可以导出区域惯量中心转子运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{\text{COL}} = \omega_0(\omega_{\text{COL}} - 1) \\ \dot{\omega}_{\text{COL}} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) / M_T \end{cases} \quad (3)$$

1.2 直流系统模型

研究直流的稳定控制时,一般不考虑直流线路的动态特性,而是把直流功率调节视为一阶惯性环节^[5],即直流功率的状态调节方程为:

$$\begin{cases} \dot{P}_{\text{dc}} = \frac{1}{T_d} (P_{\text{dcREF}} - P_{\text{dc}} + u_{\text{dc}}) \\ T_{d,\min} \leq T_d \leq T_{d,\max} \end{cases} \quad (4)$$

其中, P_{dc} 为直流输送有功功率; P_{dcREF} 为直流功率给定值; u_{dc} 为直流附加控制变量; T_d 为直流系统的惯性时间常数,是一个不确定量,其取值范围通常为 $0.1 \sim 0.3$ s。

2 直流非线性附加控制方案

2.1 SGC 理论

SGC 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^[12]。SGC 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:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (5)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为系统状态向量; $\mathbf{u}$ 为控制向量; $\mathbf{f}(\cdot)$ 为一个连续的非线性函数。根据控制目标设计宏变量:

$$\boldsymbol{\psi}(t) = \boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}, t) \quad (6)$$

系统的收敛流形定义为:

$$\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (7)$$

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(7),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:

$$T_i \dot{\boldsymbol{\psi}} + \boldsymbol{\psi} = 0, \quad T_i > 0 \quad (8)$$

其中, T_i 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:

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \frac{d\boldsymbol{\psi}}{d\mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} \quad (9)$$

代入式(8)可得:

$$T \frac{d\boldsymbol{\psi}}{d\mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + \boldsymbol{\psi} = 0 \quad (10)$$

由于引入了流形方程(7),使得系统进行了降阶处理,因此求解式(10)可得到控制变量 $\mathbf{u}$ 的解析解,使系统达到预期的控制性能。

下面讨论 SGC 的收敛性能,在 SGC 的作用下,非线性系统的运动规律是按收敛运动方程(8)收敛到流形上的,宏变量的第 i 个分量的演化规律为:

$$T_i \dot{\psi}_i + \psi_i = 0, \quad T_i > 0 \quad (11)$$

设在 t_0 时刻 ψ_i 的值为 $\psi_i(t_0)$,解方程式(11)得 ψ_i 的运动规律为:

$$\psi_i(t) = \psi_i(t_0) e^{-(t-t_0)/T_i} \quad (12)$$

由于 $T_i > 0$,故当 $t \rightarrow \infty$ 时,宏变量 $\psi_i \rightarrow 0$ 且将按指数 $-(t-t_0)/T_i$ 规律从任意初始位置衰减,最终收敛到流形 $\psi_i = 0$ 上, T_i 越小,系统收敛到流形上的速度越快,宏变量其他分量的收敛效果类同。

由以上分析可知 SGC 不需要对系统模型进行简化处理,能够直接应用于非线性系统,并且控制规律的求解过程简单,在系统偏离平衡状态较远时依然具有较好的控制效果。

2.2 控制方案的设计

一个典型的交直流并联的两区域系统可以用图 1 表示。

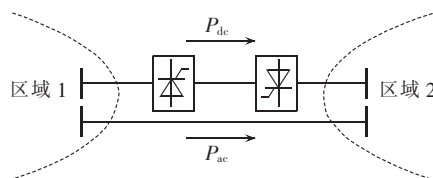


图 1 两区域交直流并联系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-area AC/DC power system

由 1.1 节可知,区域 1 (A_1) 惯量中心转子运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{\text{COL},1} = \omega_0(\omega_{\text{COL},1} - 1) \\ \dot{\omega}_{\text{COL},1} = \sum_{i \in A_1} (P_{mi} - P_{ei}) / M_{T1} \end{cases} \quad (13)$$

区域 2 (A_2) 惯量中心转子运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{\text{COL},2} = \omega_0(\omega_{\text{COL},2} - 1) \\ \dot{\omega}_{\text{COL},2} = \sum_{i \in A_2} (P_{mi} - P_{ei}) / M_{T2} \end{cases} \quad (14)$$

将式(13)和式(14)相减便得到用两区域惯量中心相对转子角和相对角速度表示的两区域系统状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{12} = \omega_0(\omega_{\text{COL},1} - \omega_{\text{COL},2}) = \omega_{12} \\ \dot{\omega}_{12} = \frac{\sum_{i \in A_1} (P_{mi} - P_{ei})}{M_{T1}} - \frac{\sum_{i \in A_2} (P_{mi} - P_{ei})}{M_{T2}} \end{cases} \quad (15)$$

其中, ω_{12} 为惯性中心角频率差。由式(15)可知,两区域互联系统失稳时,两区域惯量中心的角频率之差

状态变量 $\dot{\omega}_{12}$ 可以采用下式来确定:

$$\dot{\omega}_{12} = \frac{\omega_{12}(t) - \omega_{12}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (22)$$

其中, Δt 为测量信号的采样周期。

2.5 多馈入系统的应用

多条直流馈入同一区域的多馈入交直流混联系统的示意图如图 3 所示, n 个区域的功率通过 n 条直流线路流入区域 0。这类多馈入系统同样可以采用 SGC 来设计各条直流的附加控制器。设计宏变量为:

$$\psi = [k_1 \omega_{10} - (P_{dc,1} - P_{dc0,1}), k_2 \omega_{20} - (P_{dc,2} - P_{dc0,2}), \dots, k_n \omega_{n0} - (P_{dc,n} - P_{dc0,n})]^T \quad (23)$$

其中, ω_{n0} 为区域 n 和区域 0 的惯量中心角频率差; $P_{dc,n}$ 为第 n 条直流线路测量功率; $P_{dc0,n}$ 为稳态时第 n 条直流输送功率; k_n 为设计参数。联立流形收敛方程式(8)和直流动态方程式(4)可以得到第 i 条直流线路的附加控制规律的解析解:

$$u_{dc,i} = \left\{ k \dot{\omega}_{i0} + \frac{1}{T_i} [k \omega_{i0} - (P_{dc,i} - P_{dc0,i})] \right\} T_d + \frac{P_{dc,i} - P_{dcREF,i}}{T_i} \quad (24)$$

从式(24)可以看出,基于 SGC 的直流附加控制应用于多馈入系统的控制规律同样简洁,求解过程不需要系统的传递函数,易于在大规模系统中应用。

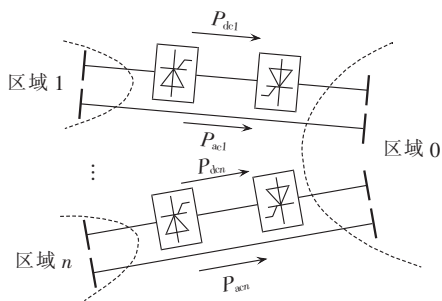


图 3 直流多馈入系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of multi-infeed DC system

3 算例仿真

3.1 稳定性研究

本文采用 PSCAD 搭建了如图 4 所示的两区域

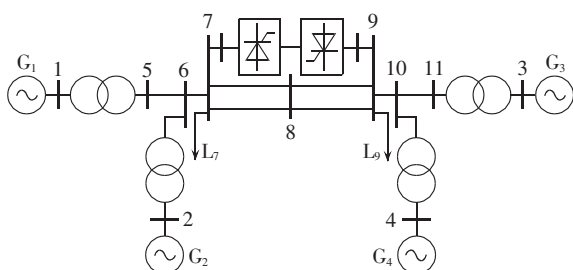


图 4 两区域交直流并联系统接线图

Fig.4 Single-line diagram of two-area AC/DC power system

交直流并联系统,其参数取自文献[18],为了更加接近实际系统,直流模型采用 CIGRE 详细电磁暂态模型,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定关断角控制,发电机采用 6 阶详细模型,均未安装电力系统稳定器,负荷采用恒阻抗模型。

采用 2.3 节所述的方法对 SGC 的控制参数进行优化,设置迭代次数为 1000 次,迭代过程示意图如图 5 所示,可以看到从 200 次开始,目标函数逐渐收敛。最终优化结果为 $k=801.121$ 、 $T=0.011$ s。

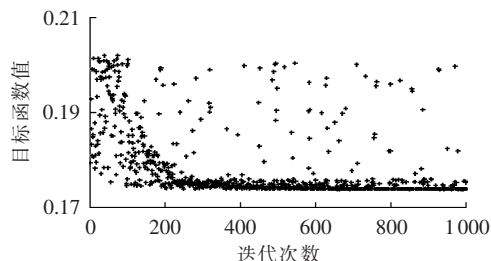


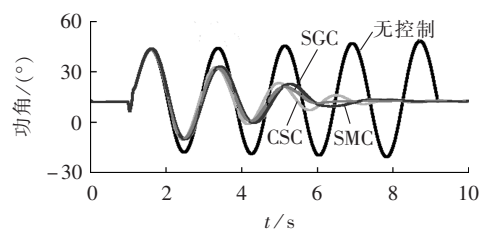
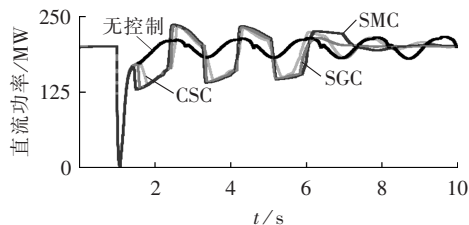
图 5 迭代优化过程示意图

Fig.5 Schematic diagram of iterative optimization process

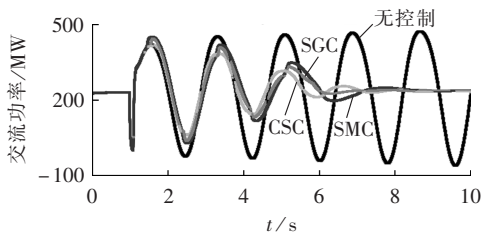
为了验证本文所提 SGC 的优越性,分别用基于极点配置方法 PPM(Pole Placement Method)设计的传统直流附加控制器 CSC(Conventional Supplementary Controller)和基于滑模控制 SMC(Sliding Mode Control)的非线性直流附加控制做对比。3 种控制器的输出限幅均为 ± 0.25 p.u.。

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。无附加控制、附加 CSC、附加 SMC 和附加 SGC 下的仿真结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,没有直流附加控制时,系统在故障后存在弱阻尼振荡失稳现象;附加 CSC、SMC 和 SGC 后,在故障后均能够使发电机功角和联络线有功功率振荡得到有效抑制,但是 CSC 的调整时间最长,SMC 次之,SGC 调整时间最短,故障后约 5 s 能够使系统回归稳态。由此可见,基于线性理论设计的直流附加控制器故障后的收敛性能不如非线性控制器,电力系统本身就是非线性系统,因此非线性控制器在系统偏离平衡状态时相比于传统线性控制器具有优越性。在直流非线性附加控制器中,SGC 的收敛性能要好于 SMC,在故障后能够更快地使系统回归稳态。

采用 SGC 仿真中宏变量的变化过程以及宏变量中各分量的变化示意图分别如图 7 和图 8 所示。与图 6(a)对比可知,故障发生后 5 s 内系统区间功角偏差和宏变量均回归稳定,证明该宏变量的选取可以表征系统的稳定情况。从图 8 可以看出,系统发生故障后,在 SGC 的作用下,宏变量中各分量能够自组织地收敛到流形,但由于每次直流调制功率能

(a) G_1 相对于 G_3 的功角

(b) 直流联络线输送有功功率



(c) 交流联络线输送有功功率

图 6 母线 7 故障时域仿真曲线图
Fig.6 Time-domain simulative curve
for fault at bus-7

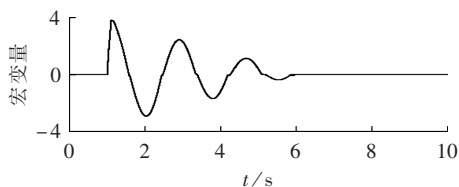


图 7 宏变量变化图
Fig.7 Curve of macro-variable

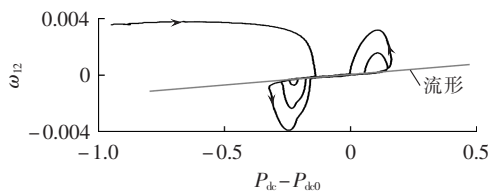


图 8 宏变量各分量变化图
Fig.8 Variation of different components of
macro variable

力的限制又驶离流形,经过几个回合,宏变量最终趋于稳定状态 $(\omega_{12}, P_{dc} - P_{d0}) = (0, 0)$ p.u.,验证了SGC在系统发生故障后的自组织性以及良好的收敛性能。

3.2 鲁棒性校验

鲁棒性是一种控制器的重要性能指标,为了校验本文所设计SGC的鲁棒性,分别在不同负荷模型、不同运行方式以及不同滞下进行对比仿真。

3.2.1 不同负荷模型校验

将负荷由恒阻抗负荷模型改为恒电流和恒阻抗

各占50%的负荷模型,在母线7处设置三相金属性接地短路故障,100 ms后切除故障。附加CSC、SMC和SGC的时域仿真结果如图9所示,由图可见发电机 G_1 相对于发电机 G_3 的功角振荡在附加SGC的情况下能够得到有效抑制,并且控制效果要好于附加CSC和附加SMC,验证了附加SGC对不同负荷模型的鲁棒性。

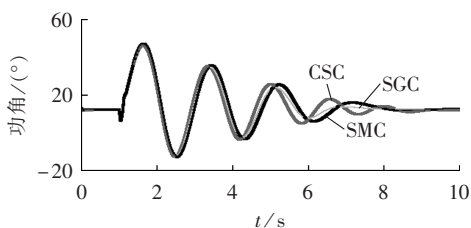


图 9 不同负荷时 G_1 相对于 G_3 的功角
Fig.9 Power angle of G_1 relative to G_3
for different load models

3.2.2 不同运行方式校验

将图4所示系统直流传输功率由200 MW改为100 MW,其他不变。故障设置为母线9发生三相金属性接地短路,100 ms后切除该故障,仿真结果如图10所示,由图可见非线性附加SGC和SMC的控制效果要好于线性控制CSC,而非线性控制中SGC能在最短时间内使系统回归稳定,验证了本文设计SGC在不同运行方式下的鲁棒性。

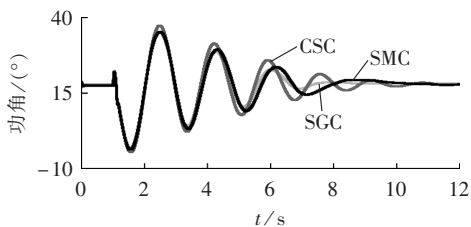


图 10 不同运行方式下 G_1 相对于 G_3 的功角
Fig.10 Power angle of G_1 relative to G_3
for different operating modes

3.2.3 时滞校验

本文所设计SGC的输入信号中发电机角频率为广域测量信号。当采用广域测量信号时,测量信号的时滞是一个必须考虑的问题,国内外运行的广域测量系统的实测总延时约为60~80 ms^[19]。文献[20]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、相量测量单元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。

在图4所示系统中,1 s时母线9发生0.1 s三相金属性接地短路故障情况下,分别对广域测量信号 ω_i 设置80 ms、160 ms时滞,与没有时滞的附加CSC仿真对比结果如图11所示。

从图11中可以看出,80 ms的时滞对本文所提

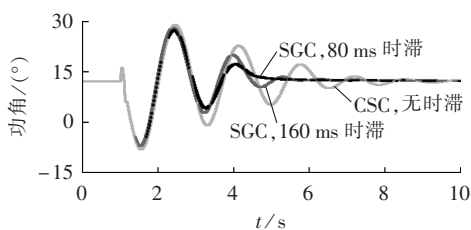


图 11 不同时滞下的 G_1 相对于 G_3 的功角曲线

Fig.11 Power angle of G_1 relative to G_3 for different time-delays

SGC 的影响不大,当时滞设为 160 ms 时,SGC 对区间功角振荡的抑制时间变长,但都能在故障后 5 s 内使其回归稳定,且控制效果优于无时滞的 CSC,验证了其在时滞情况下的鲁棒性。

3.3 多馈入系统校验

多馈入系统的校验采用如图 12 所示的两馈入系统,它是由图 4 所示系统修改得到的,参数来自文献[21],采用 2.5 节所述方法分别设计 2 条直流线路附加控制器。故障设置为 2 个具有代表性的故障:1 s 时送端区域 2 的母线 7 发生 0.1 s 三相金属性接地短路故障和 1 s 时受端区域 0 的母线 9 发生 0.1 s 三相金属性接地短路故障。同样与传统的基于 PPM 和基于 SMC 方法的直流附加控制器做对比进行仿真,结果如图 13 和图 14 所示。可以看出在 2 种故障情况下,没有附加控制时,系统在发生故障后将振荡失稳,附加 CSC、SMC 和 SGC 都能使系统回归稳定,但附加 SGC 比附加 CSC 和 SMC 的调节速度快,能够更快地抑制多馈入系统功角振荡,使系统趋于稳定。从图 14 可以明显看出,在多馈入系统受端母线 9 发生三相金属性短路故障情况下,非线性控制器 SMC 和 SGC 都能使调节过程中功角振荡相比于 CSC 更小,进一步验证了非线性的直流附加控制器相比于线性控制器在电力系统中的优越性,也验证了本文所提 SGC 在多馈入系统中的适用性和优越性。

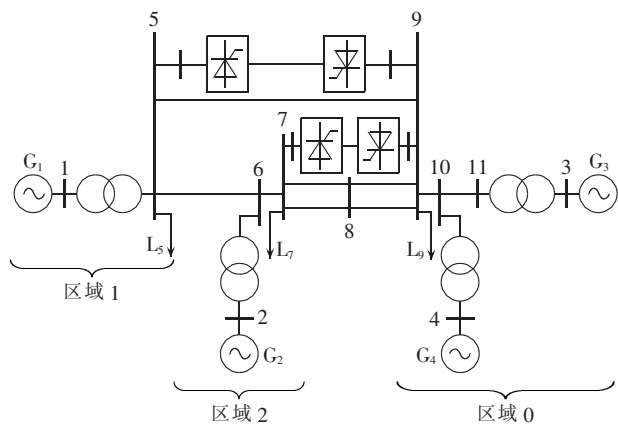
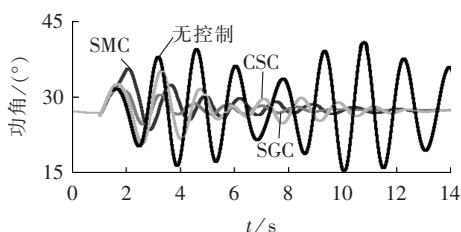
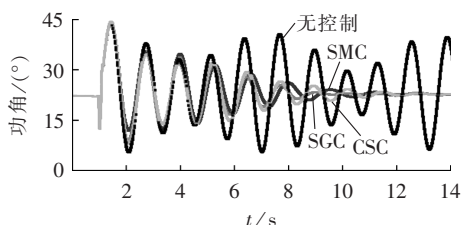


图 12 多馈入系统接线图

Fig.12 Connection diagram of a multi-infeed system

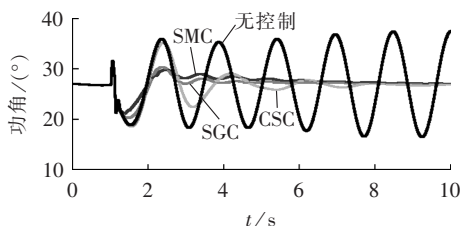


(a) G_1 相对于 G_3 的功角曲线

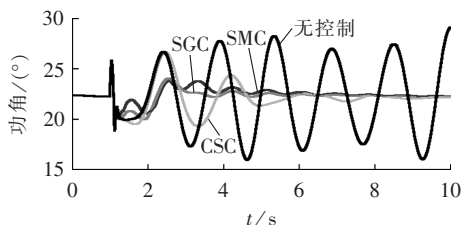


(b) G_2 相对于 G_3 的功角曲线

图 13 母线 7 三相瞬时短路故障响应曲线
Fig.13 Curve of system response to three-phase instantaneous short circuit at bus-7



(a) G_1 相对于 G_3 的功角曲线



(b) G_2 相对于 G_3 的功角曲线

图 14 母线 9 三相瞬时短路故障响应曲线
Fig.14 Curve of system response to three-phase instantaneous short circuit at bus-9

4 结论

本文提出了一种基于 SGC 的直流附加控制器,并以交直流并联两区域系统和多馈入系统为例进行时域仿真验证。结果表明:基于非线性控制理论设计的直流附加控制器在系统偏离平衡状态较远时的控制效果要好于基于 PPM 的线性化直流附加控制器;与基于 PPM 和基于 SMC 的直流附加控制器相比,所提的 SGC 能够在扰动后使系统快速恢复稳定运行,并且具有如下特点。

a. SGC 规律的推导直接利用系统的非线性,不需要系统的网架结构,广域信号仅需要发电机机端角频率,因此对网架结构变化和运行方式变化均具有较好的鲁棒性,且为固定参数控制器,有利于实际工程应用。

b. 所提 SGC 能够在不同故障、不同负荷模型、不同运行方式以及时滞情况下使系统尽快恢复稳定运行,因而具有普遍的适用性。

参考文献:

- [1] 王曦,李兴源,赵睿. 基于相对增益和改进粒子群算法的 PSS 与直流调制协调策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6177-6184.
WANG Xi,LI Xingyuan,ZHAO Rui. Coordination strategy of PSS and DCM based on relative gain and improved PSO [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(34):6177-6184.
- [2] 陈厚合,姜涛,李国庆. 直流输电对电力系统动态稳定性影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(4):36-42,47.
CHEN Houhe,JIANG Tao,LI Guoqing. Influence of HVDC on dynamic stability of power system[J]. Proceedings of the CSU-ESPA,2012,24(4):36-42,47.
- [3] 徐梅梅,李兴源,王渝红,等. 德宝直流调制对四川电网阻尼特性的影响[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23):141-146.
XU Meimei,LI Xingyuan,WANG Yuhong,et al. Impact on the damping characteristics of Sichuan power grid by Debao DC modulation[J]. Power System Protection and Control,2010,38(23):141-146.
- [4] 张步涵,陈龙,李皇,等. 利用直流功率调制增强特高压交流互联系统稳定性[J]. 高电压技术,2010,36(1):116-121.
ZHANG Buhuan,CHEN Long,LI Huang,et al. Improving the stability of UHV AC interconnected system by the DC power modulation[J]. High Voltage Engineering,2010,36(1):116-121.
- [5] 卢强,梅生伟,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:清华大学出版社,2008:1-85.
- [6] LI Y,LIU F,CAO Y. Delay-dependent wide-area damping control for stability enhancement of HVDC/AC interconnected power systems[J]. Control Engineering Practice,2015,37:43-54.
- [7] WENG H,XU Z. WAMS based robust HVDC control considering model imprecision for AC/DC power systems using sliding mode control[J]. Electric Power Systems Research,2013,95(2):38-46.
- [8] 汪娟娟,张尧,黄敏,等. 多馈入 HVDC 的模糊自适应协调阻尼控制器设计[J]. 电力系统自动化,2008,32(2):16-20.
WANG Juanjuan,ZHANG Yao,HUANG Min,et al. Design of fuzzy adaptive coordinated damping controller for multi-infeed HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(2):16-20.
- [9] 朱浩骏,蔡泽祥,刘皓明,等. 多馈入交直流输电系统的模糊控制器协调优化算法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(13):7-13.
ZHU Haojun,CAI Zexiang,LIU Haoming,et al. Coordinate optimization algorithm of fuzzy controller in multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(13):7-13.
- [10] 谢惠藩,张尧,聂树林,等. 基于正交小波神经网络的广域紧急直流功率支援在线预测[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):82-86.
XIE Huifan,ZHANG Yao,NIE Shulin,et al. Wide-area EDCPS online prediction based on orthogonal wavelet neural network [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):82-86.
- [11] 郭力,张尧,胡金磊. 基于强化学习算法的自适应直流附加阻尼控制器[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):87-91.
GUO Li,ZHANG Yao,HU Jinlei. Adaptive HVDC supplementary damping controller based on reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):87-91.
- [12] KONDRATIEV I. Synergetic control[M]. Saarbrücken,Germany: LAMBERT Academic Publishing,2009:15-76.
- [13] JIANG Z. Design of a nonlinear power system stabilizer using synergetic control theory[J]. Electric Power Systems Research,2009,79(6):855-862.
- [14] ZHAO P,YAO W,WEN J,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.
- [15] ADEMOYE T,FELIACHI A. Reinforcement learning tuned decentralized synergetic control of power systems[J]. Electric Power Systems Research,2012,86:34-40.
- [16] 王前,李韬. 基于变结构的协同控制方法及其在 DC/DC 开关变换器中应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):31-35.
WANG Qian,LI Tao. Synergetic control based on variable structure and its application in DC-DC converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(4):31-35.
- [17] RAHIMI A M,EMADI A. Active damping in DC/DC power electronic converters:a novel method to overcome the problems of constant power loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(5):1428-1439.
- [18] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:777-781.
- [19] 刘志雄,孙元章,黎雄,等. 广域电力系统稳定器阻尼控制系统综述及工程应用展望[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):152-159,183.
LIU Zhixiong,SUN Yuanzhang,LI Xiong,et al. Review of wide area PSS control system and its engineering application [J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9):152-159,183.
- [20] 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.
- [21] HE J,LU C,WU X,et al. Design and experiment of heuristic adaptive HVDC supplementary damping controller based on online Prony analysis[C]//Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]:IEEE,2007:1-7.

作者简介:



邹延生

邹延生(1991—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向为交直流电力系统稳定分析与控制(E-mail:zou2010@qq.com);

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

Design of nonlinear HVDC supplementary controller based on synergetic control

ZOU Yansheng,DONG Ping

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

Abstract: Aiming at the nonlinearity of large AC/DC power system and the inaccuracy of its model,a DC supplementary controller based on SGC(SynerGetic Control) is designed and applied to the multi-area AC/DC power system to enhance its transient stability. Appropriate macro-variable and manifold are designed according to the inertia center of each area,the analytic expression of SGC-based DC supplementary controller is deduced,and with the minimum angle frequency offset and the minimum DC power offset of areal inertia center as the objectives,the controller parameters are optimized by genetic algorithm. The designed controller is applied to a two-area AC/DC power system and a multi-infeed AC/DC power system respectively,and the time-domain simulations based on their PSCAD models demonstrate that,the proposed SGC method has better control effect in the inter-area oscillation damping than the conventional pole placement method and sliding mode control method. Furthermore,with strong robustness,the designed controller is immune to load model,operation mode and wide-area measuring signal delay,and its deduction has little dependence on the system model.

Key words: HVDC power transmission; supplementary controller; synergetic control; inertia center; transient stability; robustness

(上接第 202 页 continued from page 202)

XIAO Jianmei,ZHANG Ke,WANG Xihuai. Excitation control based on predictive function control and linear multi-variable feedback control for synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):153-159.



向为矩阵变换器、电力电子技术(E-mail: kaixin5229@163.com);

陈希有(1962—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,研究方向为无线电能传输、绿色电能变换。

作者简介:

高道男(1990—),男,山东蓬莱人,硕士研究生,研究方

高道男

Improved model predictive control of permanent magnet synchronous motor

GAO Xiaonan,CHEN Xiyu

(College of Electrical Engineering,Dalian University of Technology,Dalian 116024,China)

Abstract: All switching statuses of converter should be traversed over when traditional MPC(Model Predictive Control) algorithm is applied to determine the switching status of next cycle,which is unfavorable to the real-time implementation due to its higher computational load. An improved MPC algorithm of PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) is proposed,which determines the sector of voltage vector based on the expected voltage vector angle to reduce the selected switching statuses for cutting down the computational load. Experimental results show that,the system with the proposed MPC algorithm has better current response and smaller current ripple.

Key words: permanent magnet synchronous motor; electric current control; model predictive control; mathematical models