

基于蚁群算法的次同步附加励磁阻尼控制器设计

汤凡, 刘天琪, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 结合特征值分析和蚁群算法寻优对附加励磁阻尼控制器 (Supplementary Excitation Dampin Controller, SEDC) 的设计进行了详细探讨。在对 SEDC 结构和原理进行分析的基础上, 建立了含 SEDC 的 IEEE 次同步谐振第二标准测试系统小干扰模型。对该模型做特征值分析, 并以预设的多种运行状态下模态阻尼最大化为目标函数, 运用蚁群算法对控制器参数进行计算和优化。特征值分析和 EMTDC 仿真结果证明了采用该方法所设计的 SEDC 具有较强的鲁棒性, 能够有效抑制次同步谐振。

关键词: 次同步谐振; 附加励磁阻尼控制器; 蚁群算法; 特征值分析

Optimal design of supplementary excitation damping controller for damping SSR based on ant colony algorithm

TANG Fan, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan

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

Abstract: This paper investigates a novel strategy to design supplementary excitation damping controller (SEDC) by combining with eigenvalue analysis and ant colony algorithm. Based on the analysis of the structure and principle of the SEDC, small signal model of IEEE second benchmark model for SSR with SEDC is set up. The parameters of SEDC are calculated and optimized by maximizing the real part of eigenvalue of subsynchronous oscillation mode in several operating conditions, and ant colony algorithm is used in this process. The results of eigenvalue analysis and EMTDC simulation prove the robustness of the SEDC and the validity for SSR suppression.

Key words: subsynchronous resonance; supplementary excitation damping controller; ant colony algorithm; eigenvalue analysis

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0170-05

0 引言

我国的能源布局使得串补技术在大功率远距离输电工程中得到了广泛应用。但不适当的串补度可能激发送端大型汽轮发电机轴系严重的次同步谐振 (Subsynchronous Resonance, SSR)^[1]。针对如何抑制 SSR, 全世界曾开展了许多卓有成效的研究工作。1980年, IEEE 次同步谐振工作小组将一种利用励磁控制抑制 SSR 的方法作为推荐措施之一, 并将其称为励磁系统阻尼器 (Excitation System Damper)^[2]。

励磁控制相对于其他很多利用一次设备抑制 SSR 的方法在经济性和灵活性上具有很大优势。自提出以后, 便引起各国学者的极大关注。文献[1]从理论上证明了线性励磁控制抑制次同步谐振的有效

性, 但其所使用的反馈参数过多, 有些参数在实际系统中可能无法采集到。文献[3]基于模态控制理论提出一种利用发电机转速和定子电流作为反馈信号的附加励磁控制, 但由于其模态阻尼值的选择具有随机性, 会影响到控制器参数的整定。文献[4]指出针对某一扭振模态设计的附加励磁控制回路, 在向该扭振模态和与它相容模态提供正阻尼的同时会向其相斥模态提供负阻尼, 并以相应模态转速信号作为输入设计改进型 PSS 来阻尼 SSR。但该方案依旧存在反馈信号不易直接测量的问题。文献[5]基于阻尼特性分析设计了一种附加励磁阻尼控制器, 并分析了带通滤波器对电气阻尼的影响, 但其控制参数的确定具有一定的尝试性, 并且未对控制器参数在多运行方式下的鲁棒性做深入探讨。文献[6]将模拟退火算法应用到内蒙古上都电厂 SEDC 的参数整定中, 文献[7]则在其基础上基于现场试验调整 SEDC 参数, 小干扰试验表明运用该方法设计的 SEDC 对

基金项目: 国家电网科技项目 (09H1197)

次同步扭振模态具有很好的阻尼作用, 但大扰动下该 SEDC 的表现则有待进一步验证。文献[8]仍然以上都电厂为例, 进一步讨论改进粒子群算法在 SEDC 设计中的应用, 从其优化结果来看, 运用这种方法计算出的 SEDC 增益值偏大, 可能会对励磁系统的常规功能产生影响, 所以该文献最后仍然以时域仿真结果来确定最终的 SEDC 增益, 这样做可能会削弱优化的准确性, 并且也不具有普遍意义。因此如何设计并优化 SEDC 仍然是一个值得深入研究的问题。

本文基于 IEEE 次同步谐振第二标准测试系统建立了含 SEDC 的小扰动模型, 在此基础上研究结合特征值分析和蚁群算法设计 SEDC 的方案。综合考虑 SEDC 各环节对次同步扭振模态阻尼的影响, 并通过蚁群算法强大的搜索能力求解 SEDC 参数。特征值分析和 EMTDC 仿真结果表明利用该方案所设计的 SEDC 能够在多种运行方式下有效阻尼 SSR。

1 SEDC 的结构及原理

图 1 是本文 SEDC 的结构框图, 其支路由待控制系统在次同步频率下的振荡模态数决定。以汽轮机发电机高压缸转速偏差为输入信号, 输出为励磁电压调节器的附加控制信号。基于模态分离思想^[4], 每个 SEDC 回路都采用带通滤波器将转速偏差信号中的各扭振频率分量进行分离, 并分别进行相位补偿和放大, 将处理后信号叠加限幅再送入励磁调节器, 以实现各扭振模态的独立控制。并且当存在多个次同步振荡模态时, 该结构能起到同时改善各模态阻尼的作用。

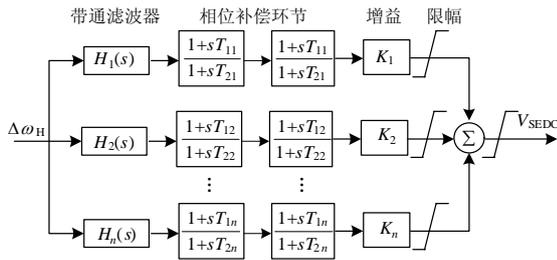


图 1 SEDC 结构框图

Fig.1 Block diagram of the SEDC

在次同步频率下, 由励磁系统造成的相位滞后一般在 $180^\circ \sim 270^\circ$ 之间^[5], 过多的相位补偿环节会造成放大倍数整定困难。而用两个相同的超前滞后环节, 配以正负可调的放大倍数, 则在 $180^\circ \sim 270^\circ$ 范围内总是可以满足相位补偿要求。相位补偿环节参数可由待补偿角度确定, 如式 (1)。

$$\begin{cases} T_{1i} = (\omega_i \sqrt{(1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi)})^{-1} \\ T_{2i} = \sqrt{(1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi)} / \omega_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: φ 为 0.5 倍待补偿角度; ω_i 为所考虑模态频率的角速度。

2 系统模型

IEEE 次同步谐振第二标准测试系统模型由 IEEE 次同步谐振工作组于 1985 年发布, 图 2 中所示是它的第一种形式。轴系由四段集中质量块表示, 具有 3 个次同步振荡模式, 分别为 24.7 Hz (模式 1)、 32.4 Hz (模式 2) 和 51.1 Hz (模式 3)。相对于第一标准测试系统, 这种接线方式在实际系统中更为常见^[9]。

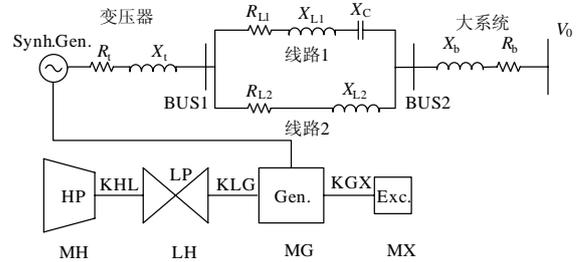


图 2 IEEE 次同步谐振第二标准模型

Fig.2 IEEE second benchmark model for SSR

特征值分析中, 发电机一般由 dq 坐标系下的电机基本参数模型表示。关于该系统中轴系、发电机的数学模型, 文献[10]中已做了较为详细的分析, 此处不再赘述。文中拟分别针对双回线路和单回线路在多种运行条件下对系统进行特征值分析, 输电线路部分数学模型为

$$\begin{cases} \frac{dV_{cd}}{dt} = \omega_b \mu X_{LE} i_d + \omega_b V_{cq} \\ \frac{dV_{cq}}{dt} = \omega_b \mu X_{LE} i_q - \omega_b V_{cd} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_{cd} 、 V_{cq} 为串联电容上在 dq 坐标系下的电压; $\mu = X_C / X_{L1}$ 为线路的串补度; $\omega_b = 2\pi f_0$ 为同步频率下的角速度。当线路 1、2 同时供电时

$$X_{LE} = \frac{X_{L1} \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{L1} + X_{L2} - \mu X_{L1})^2}}$$

当仅线路 1 供电时, $X_{LE} = X_{L1}$ 。

不计励磁机饱和作用、不考虑限幅环节, 励磁系统传递函数如图 3 所示, 其中 V_{SEDC} 为附加励磁阻尼控制器的输出信号, 写出励磁系统的基本方程为

$$\begin{cases} \frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{T_R}V_i - \frac{1}{T_R}V_R \\ \frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{K_A}{T_A}(V_{ref} - V_R - V_F + V_{SEDC}) - \frac{E_{fd}}{T_A} \\ \frac{dV_F}{dt} = \frac{K_F K_A}{T_A T_F}(V_{ref} - V_R - V_F + V_{SEDC}) - \frac{V_F T_A + E_{fd}}{T_A T_F} \end{cases} \quad (3)$$

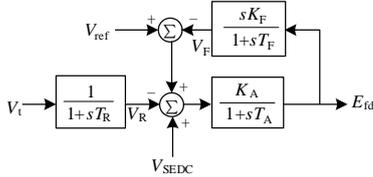


图3 励磁系统传递函数框图

Fig.3 Block diagram of the excitation system

再考虑建立图1所示SEDC的数学模型，因各模态控制回路相互独立，可单独进行建模。滤波器环节采用二阶带通滤波器，于是每个控制回路可以用一个四阶状态空间模型描述。不计汽轮机转矩变化及调速器的调节作用，图2所示系统可写成如式(4)状态空间标准形式

$$\dot{X} = AX \quad (4)$$

式中：

$$\begin{aligned} X &= [X_M \ X_E \ X_{SEDC}]^T \\ X_M &= [\Delta\omega_H, \Delta\theta_H, \Delta\omega_L, \Delta\theta_L, \Delta\omega, \Delta\theta, \Delta\omega_X, \Delta\theta_X] \\ X_E &= [\Delta i_d, \Delta i_q, \Delta i_f, \Delta i_{kd}, \Delta i_{kq}, \Delta V_{cd}, \Delta V_{cq}, \Delta V_R, \Delta V_F, \Delta E_{fd}] \\ X_{SEDCi} &= [\Delta V_{1i}, \Delta V_{2i}, \Delta V_{3i}, \Delta V_{SEDCi}] \end{aligned}$$

其中： ΔV_{1i} 、 ΔV_{2i} 、 ΔV_{3i} 、 ΔV_{SEDCi} 分别为SEDC模态*i*控制回路的四阶状态变量，其余变量符号意义同参考文献[1]。系统初始运行状态为机组有功出力0.9 pu、功率因数为0.9（滞后）、机端电压1.0 pu，线路1、2同时接通；取励磁系统中 $T_R=0.02$ ， $T_A=0.001$ ， $K_A=187$ ， $K_F=0.001$ ， $T_F=0.1$ ；SEDC放大倍数设置为0，使其对系统扭振模式阻尼无影响，代入式(4)中形成系统状态矩阵并做特征值计算。

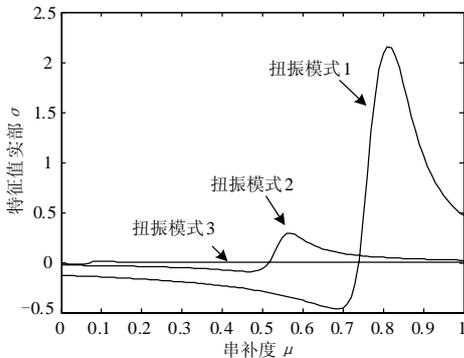


图4 扭振模式阻尼随串补度变化曲线

Fig.4 Variation of real parts of eigenvalues with μ

图4是系统扭振模式阻尼随线路串补度变化的曲线，其与文献[10]中所提供结果是一致的，从而验证了本文所建立的小干扰模型的正确性。

3 蚁群算法及SEDC参数优化

蚁群算法^[11]是一种求解组合最优化问题的新型通用启发式方法，该方法具有正反馈、分布式计算和富于建设性的贪婪启发式搜索的特点。它来源于人类对蚂蚁觅食行为的观察：当蚂蚁在寻找食物源时，能在其通过的路径上留下信息素，使一定范围内的其他蚂蚁也能察觉并影响其以后行为，当一条路径上通过的蚂蚁越多时，该路径上的信息素强度也越大，其他蚂蚁选择该路径的机会就更大。这实际上形成了一个正反馈机制，随着越来越多的蚂蚁通过该路线，一条最佳的路径就会逐渐形成。因此，通过选择适当的目标函数和搜索空间，利用蚁群算法强大的搜索能力，可以对控制器参数进行计算和优化。

本文以待补偿角度和SEDC放大倍数为搜索变量，即蚁群位置；以多种运行方式下模态阻尼最大化，即闭环控制系统特征值实部最小化作为目标函数：

$$J = \min(\max(\sum \text{Re}(\lambda_i)_j)) \quad (5)$$

式中： $\text{Re}(\lambda_i)$ 表示模态*i*的特征值实部； $j=1, 2, \dots, m$ 表示不同的运行状态，*J*的大小可以由搜索空间内的信息素大小来表征，*J*越小则信息素越大。通过蚁群算法寻找最佳补偿角度和放大倍数，使特征值实部在搜索空间内最大限度移向复平面左侧，计算流程如图5所示。

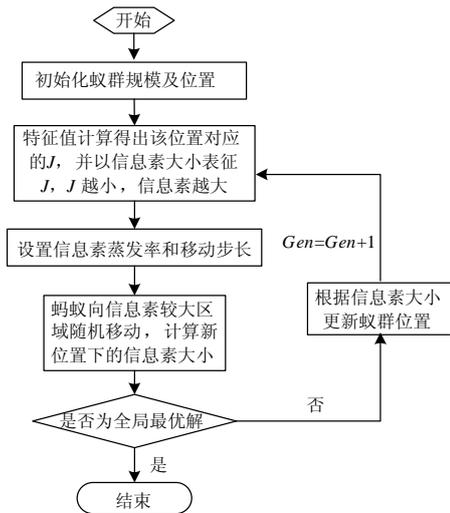


图5 参数优化流程图

Fig.5 Flow chart of the optimization

式(4)中状态矩阵 A 含有 SEDC 相位补偿环节时间常数和放大倍数等变量, 前者可由待补偿角度经式(1)算出, 因此可将待补偿角度和放大倍数作为寻优变量。为避免 SEDC 输出在大扰动下易达到限幅值, 使励磁系统出现不适当控制状态, 并考虑到带通滤波器本身所具有的增益, 将放大倍数搜索范围限定在 $[-8, 8]$ 。再结合前面对励磁系统造成的滞后相位的分析, 将待补偿角度搜索范围限定在 $[-160^\circ, 160^\circ]$ 。考虑线路 1、2 同时和仅线路 1 供电的情况下, 机组有功出力分别为 0.5 pu、0.7 pu 和 0.9 pu 六种运行状态, 串补度为 55%, 并不计机械阻尼。

设置蚁群规模为 30 只, 迭代次数为 20 次, 信息素蒸发概率为 20%, 按照图 5 所示流程计算并优化 SEDC 参数。在蚁群向信息素较大位置移动的过程中, 若出现蚂蚁位置超出搜索范围的现象, 则将蚂蚁位置固定在边界, 并等待下一次迭代。为提高搜索精度, 移动步长随迭代次数的增加而逐渐减小。最终的计算结果如表 1 所示。再分别对不含 SEDC 和含 SEDC 的系统进行特征值分析, 结果如表 2 所示。可见未加入 SEDC 前, 系统存在一个不稳定模式 2, 加入 SEDC 后模式 1、2 所对应的特征值实部都移动到了复平面上虚轴的左侧, 说明按上述方法设计的 SEDC 能够有效增加这两种扭振模式下的阻尼。模式 3 的负阻尼值很小且振荡频率很高, 由它难以激发次同步谐振而通常可以不予考虑^[9]。图 6 是扭振模式 3 的特征值实部随 SEDC 模态 3 支路参数变化的三维效果图, 可见该模式阻尼本身受控

制器影响很小。但结合表 2 数据可以发现按本文的设计方法可以在指定范围内找到对提升该模式阻尼有利的点, 从而证明了设计方法的有效性。

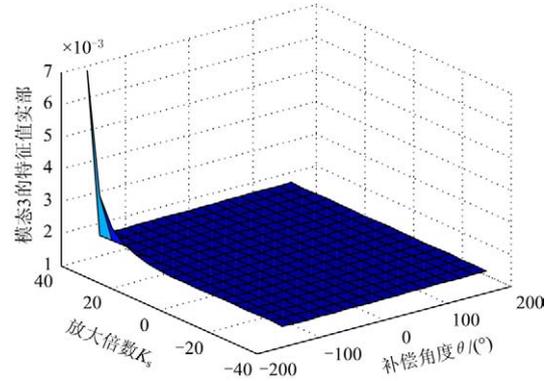


图 6 扭振模式 3 阻尼随 SEDC 参数变化图

Fig.6 Variation of real parts of third torsional mode with parameters of SEDC

4 EMTDC 仿真

表 2 结果表明在小干扰情况下, 所设计的 SEDC 能够增加系统阻尼。为验证暂态过程中 SEDC 的作用, 在 PSCAD/EMTDC 中建立图 2 的电磁暂态仿真模型。其中发电机额定容量为 600 MVA, 采用 ST1A 型励磁系统, 参数同特征值分析。对系统进行不同运行条件下的仿真, 结果如图 7~10 所示。各图中所设置故障均为 0.7 s BUS2 处发生三相接地短路, 0.1 s 后故障切除, SEDC 于故障切除后 1 s 投入运行。图中, ω_{HP} 、 ω_{LP} 、 ω_{GEN} 、 ω_{EXC} 分别表示高压缸、低压缸、发电机和励磁机的角速度增量。

通过对比有无 SEDC 的轴系角速度增量曲线可以发现, 未加入 SEDC 控制时, 系统在扰动后汽轮发电机组轴系的各段都发生剧烈摇摆, 并且随着时间的推移, 摆动幅度不断增加, 说明系统 SSR 不稳

表 1 SEDC 参数

Tab.1 The optimized parameters of SEDC

模态 i	T_{1i}	T_{2i}	放大倍数 K_i
1	0.022 937	0.001 810 1	-2
2	0.027 757	0.000 869 3	1
3	0.014 368	0.000 675 15	8

表 2 特征值分析结果

Tab.2 Results of eigenvalue analysis

状态	Pe	模式 1		模式 2		模式 3	
		无 SEDC	有 SEDC	无 SEDC	有 SEDC	无 SEDC	有 SEDC
双回	0.5	-0.117	-0.381	0.374	-1.714	9e-4	7e-4
	0.7	-0.206	-0.532	0.367	-1.952	13e-4	11e-4
	0.9	-0.299	-0.666	0.352	-2.077	17e-4	15e-4
单回	0.5	-0.054	-0.321	0.037	-0.460	10e-4	8e-4
	0.7	-0.112	-0.434	0.013	-0.610	15e-4	13e-4
	0.9	-0.173	-0.531	-0.014	-0.712	19e-4	17e-4

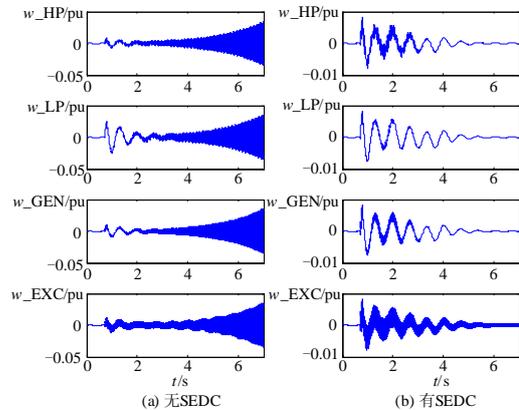


图 7 两回线路 $P_e=0.9$ pu 时的角速度增量曲线

Fig.7 Response for double line and $P_e=0.9$ pu

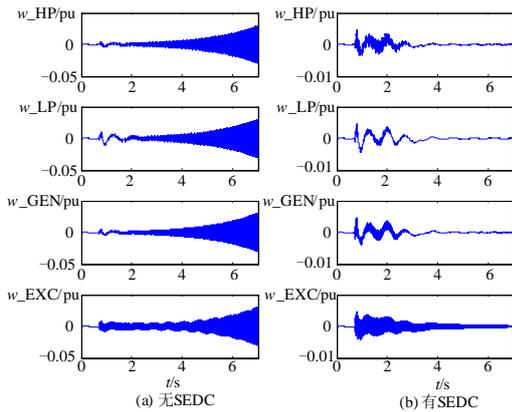


图8 两回线路 $P_e=0.5$ pu 时的角速度增量曲线
Fig.8 Response for double line and $P_e=0.5$ pu

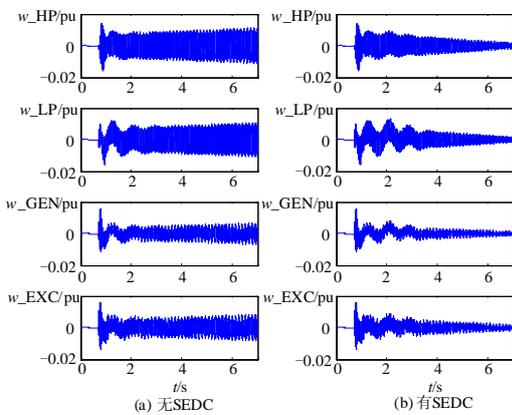


图9 单回线路 $P_e=0.5$ pu 时的角速度增量曲线
Fig.9 Response for single line and $P_e=0.5$ pu

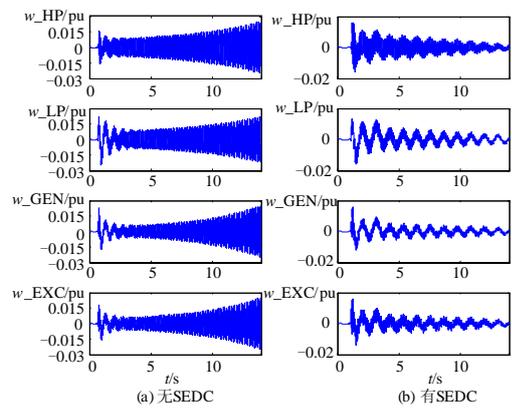


图10 单回线路 $P_e=0.9$ pu 时的角速度增量曲线
Fig.10 Response for single line and $P_e=0.9$ pu

定。而在 SEDC 的控制下，轴系各段的摇摆迅速衰减，说明 SSR 得到了有效的抑制。从振荡的衰减速率来看，当采用双回线路供电时，投入 SEDC 后轴系振荡幅值衰减较快，单回输电线路时轴系振荡幅值则需要更长时间才能衰减下来，这与前面的特征值分析结果中的各种运行条件下的阻尼值大小是相

一致的。究其原因，则是因为单回输电线路时的系统等值串补度增加，造成电气部分的谐振频率减小，所激发的机械系统的谐振频率增加。而带滤波器的通带很窄，因此造成 SEDC 的阻尼效果受到一定程度的影响，使轴系振荡衰减时间增加。另一方面从图 10 中可见其低频振荡的衰减时间较长，这是因为外部系统结构的变化使得外部系统的等值电抗增加，在线路重载的情况下其系统本身的低频振荡阻尼受到影响。但从其高频信号的衰减情况来看，SEDC 比较好地阻尼了次同步频率下的振荡。综合考虑以上几种运行条件下的仿真结果可见这种 SEDC 具有较强的鲁棒性，在外部系统等值串补度变化时仍然能为系统提供较强的阻尼，并且不会对励磁系统的其他功能产生影响。

5 结论

本文将特征值分析与蚁群算法相结合来对基于励磁控制的附加次同步阻尼控制器进行设计。以 IEEE 次同步谐振第二标准测试系统为例，通过建立含次同步阻尼控制器的系统小干扰模型，以多种运行条件下的系统模态阻尼最大化为目标函数，运用蚁群算法进行求解，可实现控制器参数的计算和优化。特征值分析和时域仿真的结果都证明了运用该方法所设计的 SEDC 能在多种运行条件下对次同步谐振提供阻尼作用，具有较强的鲁棒性，并且不会对励磁系统的常规功能产生影响。

参考文献

- [1] 余耀南. 动态电力系统[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985: 136-166.
- [2] IEEE subsynchronous resonance working group. Countermeasures to subsynchronous resonance problems [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1980, 99 (5): 1810-1818.
- [3] WANG Li, Hsu Yuan-Yih. Damping of subsynchronous resonance using excitation controliers and static VAR compensators: a comparative study[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1988, 3 (1): 6-13.
- [4] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 360-370.
- [5] 张帆, 徐政. 附加励磁阻尼控制抑制次同步谐振研究 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (23): 24-29. ZHANG Fan, XU Zheng. Studies on a supplementary excitation damping controller for mitigating SSR[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (23): 24-29.

(下转第 179 页 continued on page 179)

- based on COM and its application in power monitoring system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22 (2): 20-25.
- [5] 李银红, 王星华, 段献忠. 电力系统继电保护整定计算软件的研究[J]. 继电器, 2001, 29 (12): 5-7.
LI Yin-hong, WANG Xing-hua, DUAN Xian-zhong. Study of relay coordination software[J]. Relay, 2001, 29 (12): 5-7.
- [6] 曹阳, 姚建国, 张慎明, 等. XML技术在电网自动化系统中的应用探讨[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (21): 73-76.
CAO Yang, YAO Jian-guo, ZHANG Shen-ming, et al. Application of XML in the automation system of power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (21): 73-76.
- [7] 杨增力, 段献忠, 王友怀, 等. 输电线路接地距离保护整定计算方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (8): 65-69.
YANG Zeng-li, DUAN Xian-zhong, WANG You-huai, et al. Coordination of ground distance relays for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (8): 65-69.
- [8] 杨雄平, 段献忠. 基于厂站方式灵敏系数的运行方式组合方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (23): 69-73.
YANG Xiong-ping, DUAN Xian-zhong. A method for combining the operation modes based on the operation mode switching sensitivity factor of power substations or plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (23): 69-73.
- [9] 邓健, 宋玮, 张明霞, 等. 基于组件技术的继电保护整定计算软件的设计与实现[J]. 继电器, 2004, 32 (6): 44-48.
DENG Jian, SONG Wei, ZHANG Ming-xia, et al. Design and realization of component based software for relay protection[J]. Relay, 2004, 32 (6): 44-48.
- [10] 陈湘波, 冯林桥, 刘飞, 等. 短路计算与继电保护整定图示一体化软件[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (11): 47-48.
CHEN Xiang-bo, FENG Lin-qiao, LIU Fei, et al. Graphic and integrative program for fault analysis and protection setting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (11): 47-48.

收稿日期: 2009-10-16; 修回日期: 2009-12-07

作者简介:

高红艳 (1979-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为继电保护整定计算、电力系统无功补偿等; E-mail: xiaoyazi3000@163.com

杨志刚 (1985-), 男, 助理工程师, 从事电网规划以及用电可研等。

(上接第 174 页 continued from page 174)

- [6] 刘世宇, 谢小荣, 张东辉, 等. 多模式次同步谐振的产生机理与抑制方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48 (4): 457-460.
LIU Shi-yu, XIE Xiao-rong, ZHANG Dong-hui, et al. Mechanism and mitigation of multi-mode subsynchronous resonance[J]. Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2008, 48 (4): 457-460.
- [7] 郭锡玖, 谢小荣, 刘世宇, 等. 上都电厂 SEDC 提高次同步扭振阻尼的现场试验[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (10): 97-100.
GUO Xi-jiu, XIE Xiao-rong, LIU Shi-yu, et al. Field test of SEDC for subsynchronous torsional damping enhancement at shangdu power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (10): 97-100.
- [8] 顾益磊, 王西田, 赵大伟, 等. 基于改进粒子群算法的附加励磁阻尼控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (7): 11-16.
GU Yi-lei, WANG Xi-tian, ZHAO Da-wei, et al. Optimization design of supplementary excitation damping controller based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (7): 11-16.
- [9] IEEE Subsynchronous Resonance Group. Second benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104 (5): 1057-1066.
- [10] Harb A M, Widyan M S, Modern. Nonlinear theory as applied to SSR of the IEEE second benchmark model[C]. // IEEE Bologna Power Tech Conference. 2003: 7-13.
- [11] 马良, 朱刚, 宁爱兵. 蚁群优化算法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

收稿日期: 2009-10-30; 修回日期: 2009-12-08

作者简介:

汤凡 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制; E-mail: tangfance@msn.com

刘天琪 (1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制, 调度自动化及能量管理系统等;

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制, 高压直流输电等。