

一种混合遗传算法在 HVDC 定电流控制器参数优化中的应用

喻锋¹, 王西田¹, 杨煜², 黎小林²

(1. 上海交通大学电气工程系电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510623)

摘要: 为了改进遗传算法的局部收敛能力, 提出了一种新的融合遗传算法和单纯形法的混合遗传算法。该算法兼具遗传算法的全局收敛性和单纯形法良好的局部收敛能力, 当遗传算法陷入停滞, 由单纯形法引导进化方向。针对直流输电定电流控制器参数优化的具体问题, 设计了一套系统化混合遗传算法寻优方案, 并详尽叙述了该方案的流程及具体实现步骤。该方案选取 ITAE 为目标函数, 直流输电准稳态模型为目标函数的计算模型; PI 参数的可行域由基于直流输电 PSCAD/EMTDC 模型仿真的直流电压稳定性计算确定。最后通过 CIGRE HVDC Benchmark 模型的 PSCAD/EMTDC 仿真验证所设计参数优化方案的有效性。

关键词: 直流输电; 定电流控制; PI 参数; 混合遗传算法; 准稳态模型

An application of hybrid genetic algorithm in the parameters optimization of HVDC constant current controller

YU Feng¹, WANG Xi-tian¹, YANG Yu², LI Xiao-lin²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: First of all, in order to improve the local search ability of genetic algorithm, a new hybrid genetic algorithm combining genetic algorithm and simplex method is presented; in which both the global convergence of genetic algorithm and local search ability of simplex method are in full use; when the evolution of genetic algorithm is bogged down, the simplex method is involved to lead the direction. Then aiming at optimizing the parameters of HVDC constant current controller, a systematic scheme using the hybrid genetic algorithm is designed. After an expatiation upon the basic flow and main steps of the hybrid genetic algorithm, the implementation of parameters optimization is detailed. The ITAE is selected as objective function in the scheme. By building the HVDC Quasi-Steady-State (QSS) models, a reasonable calculation models are achieved. The DC voltage stability in the process of PSCAD/EMTDC simulation is judged to search the PI parameters boundary. At last the effectiveness of the proposed scheme is demonstrated by PSCAD/EMTDC simulation results on the CIGRE HVDC Benchmark model.

Key words: HVDC; constant current control; PI parameters; hybrid genetic algorithm; QSS model

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)09-0126-06

0 引言

控制系统及控制策略的设计和优化是高压直流(HVDC)输电研究的重要内容。稳定可靠的控制能够使直流系统完成快速调节, 并且改善交流系统的运行特性。比例积分(PI)控制器作为直流输电定电流控制主要组成部分, 对直流输电系统的稳定性影响重大。PI控制器具有结构简单、容易实现、控制效果好、鲁棒性强等特点^[1-3]。为了使直流输电系统获得良好的稳定性及动态响应特性, 须选取合

适的方案对PI控制器参数进行优化^[4-5]。

遗传算法是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机化搜索方法, 其具有良好的全局寻优能力。但该算法进化到一定阶段之后, 所得的参数相似度高, 进化速度显著下降, 易收敛于全局较优解。单纯形法具有收敛迅速的显著优点, 但若初值选择不合理容易导致收敛于局部最优解^[6-7]。混合遗传算法将遗传算法和单纯形法两者的优势结合, 已在航空^[8]、图像处理^[9]与模型参数优化^[10]等多领域得到大量的应用。本文提出了一种新的全局快速收敛混

合遗传算法, 并将该算法运用于直流输电定电流控制器 PI 参数优化, 设计了一套系统化的优化方案。通过 CIGRE HVDC Benchmark 模型的 PSCAD/EMTDC 仿真验证本文设计的优化方案的有效性。

1 直流输电准稳态模型

参数寻优的过程需要大量重复性的仿真计算, 不合适的模型可能导致优化时间过长, 而难以得到理想的结果。直流换流器准稳态模型在交直流机电暂态研究中得到广泛采用, 该模型虽然是简化计算模型, 但同时达到了参数优化模型需兼顾速度和精度的要求^[1]。本文搭建直流输电准稳态模型及其控制系统作为本文优化计算模型, 其结构如图 1 所示。

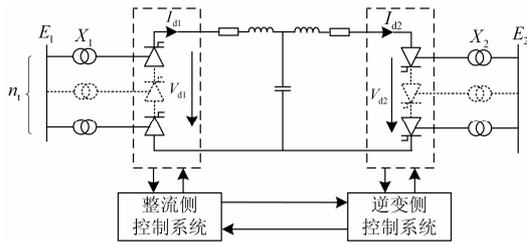


图 1 高压直流输电系统准稳态模型结构图

Fig. 1 Structure of HVDC QSS model

其中换流器准稳态模型可描述为式(1)。直流输电控制系统整流侧采用定电流控制, 逆变侧采用定 γ 角控制可表示为式(2)。

$$\begin{cases} V_{d1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_1 E_1 k_{T1} \cos \alpha - \frac{3X_1}{\pi} n_1 I_{d1} \\ V_{d2} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_2 E_2 k_{T2} \cos \beta + \frac{3X_2}{\pi} n_2 I_{d2} \\ \gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_{d2}X_2}{E_2 k_{T2}} + \cos \beta\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \pi - (K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s})(I_{dref} - I_{d1}) = \alpha \\ (K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s})(\gamma_{ref} - \gamma) = \beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_d 为直流母线电压; E 为换流母线电压; α 、 β 和 γ 分别为整流侧触发延时段角、逆变侧触发滞后角和熄弧角; X 为折算到阀侧的换流变压器的漏抗; n_t 为换流器构成桥数; k_T 为换流变压器变比; I_d 为直流母线电流; 下标 1 代表整流侧; 下标 2 代表逆变侧。

2 遗传-单纯形混合算法

2.1 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm) 是由美国 Michigan 大学 J.Holland 教授于 1975 年首先提出来的, 是一种基于自然选择和基因遗传学原理的全局自适应搜索算法。遗传算法具有优秀的全局搜索能力, 可以对解空间中的全体解进行搜索, 而不会陷入局部最优解的下降陷阱。遗传算法也存在着固有的缺陷: 遗传算法是在一定概率条件下随机进行, 因此它为群体中个体提供了进化机会的同时, 也不可避免地产生了退化; 遗传算法局部收敛能力差, 在进化后期因基因的相似度很高, 搜索效率较低, 往往只能收敛于全局较优解。

2.2 单纯形法

单纯形法 (Simplex Method) 是美国数学家 George Dantzig 于 1947 年首先提出来的。它的理论根据是: 线性规划问题的可行域是 n 维向量空间 R_n 中的多面凸集, 其最优值如果存在, 必在该凸集的某顶点处达到。单纯形法是一种直接搜索方法, 它有很强的局部搜索能力, 有限的优化次数内一定能收敛。单纯形法容易陷于局部最优点, 该算法对初值信赖度很高。

2.3 混合遗传算法

本文提出了一种遗传-单纯形混合算法。该算法以遗传算法为主, 单纯形法为辅, 在保留了传统遗传算法种群的个体差异性, 不影响其全局搜索能力的同时, 又利用了单纯形法局部寻优快的优势。混合遗传算法具有全局收敛性和局部收敛迅速的显著优点, 其计算过程可以分为以下三个阶段:

(1) 传统的遗传算法全局的优化。

(2) 遗传算法进化渐趋停滞, 嵌入单纯形算法引导遗传算法优化。当遗传算法优化得到的参数趋于稳定时, 以遗传算法得到的最优成员参数作为单纯形法的初值进行优化, 并将结果返回并更新最优成员参数, 其他一般个体不进行操作保持原有属性; 得到新的全体成员然后按传统遗传算法进化, 其过程如图 2 所示。

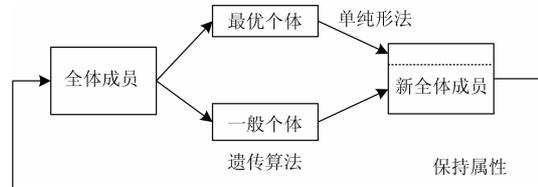


图 2 混合遗传算法示意图

Fig. 2 Flowchart of hybrid genetic algorithm

(3) 终止判定。单纯形法得到的最优成员参数连续若干次均方差小于设定值，该条件满足时算法结束。

3 基于混合遗传算法定电流控制器 PI 参数优化

3.1 目标函数

目标函数作为算法优化选择的标准，其选取直接影响算法的性能。误差积分性能指标(ITAE)是过渡过程中时间乘以误差绝对值的积分，具有较好的工程实用性和选择性^[12]，该目标函数可表示为

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_s} t |e(t)| dt \quad (3)$$

式中：积分上限 t_s 为动态过程时间； $e(t)$ 在定电流控制器 PI 参数优化中选取为电流参考值与测量值的差。该目标函数综合考虑电流跟踪误差与调节时间，而且能抑制稳态误差，可作为本文优化的选择指标。

3.2 可行域

为了使直流输电定电流控制器 PI 参数的搜索空间与实际直流输电工程相结合，本文提出借助于 PSCAD/ EMTDC 直流模型仿真确定 K_p 、 K_i 可行域的方法：由式(1)和式(2)可知，定电流控制 PI 参数的选取直接作用于整流侧触发角 α ，进而影响直流电压。若稳态情况下直流电压的变化大于 5%，则可认为该控制器 PI 参数不合理。假设直流电流恒定，即忽略换流变等效阻抗压降的变化，满足式(4)的点为可行点。将 K_p 、 K_i 参数沿水平和垂直方向分别以 0.1 和 10 的步长进行划分，并对各点分别进行仿真，由可行点包围区域即为可行域。

$$|\Delta\alpha| < \frac{\pi V_{dc}}{60\sqrt{2}n_1 E k_T \sin \alpha_0} \quad (4)$$

式中： V_{dc} 为直流电压额定值； α_0 、 $\Delta\alpha$ 分别为整流侧触发角的稳定工作点和变化幅度。

3.3 PI 参数的混合遗传算法优化步骤

本文将设计的混合遗传算法运用于直流输电定电流控制器 PI 参数优化，其流程图如图 3 所示，现将各步详尽描述如下。

步骤 1：参数初始化。设定种群规模，并随机产生初始种群；设置参数搜索空间维度；设定新个体产生比例、交叉概率、变异率。

步骤 2：搭建高压直流输电准稳态 Simulink 模型和 J_{ITAE} 计算模块。

步骤 3：PSCAD/ EMTDC 仿真确定 K_p 、 K_i 参数寻优的可行域。

步骤 4：遗传算法优化。将各个成员变量值赋予 K_p 和 K_i ，调用 Simulink 模型计算阶跃响应中各成员的目标函数值 J_{ITAE} ；由指标值计算适应度，并以此对成员进行排序；完成遗传算法中三个模拟生物基因遗传操作的遗传算子：选择、交叉和变异。

步骤 5：嵌入单纯形法条件判断。本文选取进化过程中连续 n 代群体最优成员的适应度差值小于某足够小的正数 ξ 为判断条件，若满足则认为遗传算法趋于收敛，执行步骤 6；否则转到步骤 4。

步骤 6：混合算法寻优。将步骤 5 得到的最优成员变量作为单纯形法的初值，启用单纯形法寻优，得到最优目标函数值 X_{opt} 及最优变量 K_{po} 和 K_{io} ；并将它们更新至遗传算法最优成员。若 X_{opt} 满足均方差小于误差允许值 σ ，即式 (5)，重复以上过程直到 i 达到设定值 N_s 为止。

$$\sqrt{\frac{1}{i} \sum_1^i (X_{opt}(i) - \mu)^2} < \sigma \quad (5)$$

其中： i 为连续满足式 (5) 的次数； σ 为最大允许的均方根误差； μ 为前 i 次 X_{opt} 的平均值。

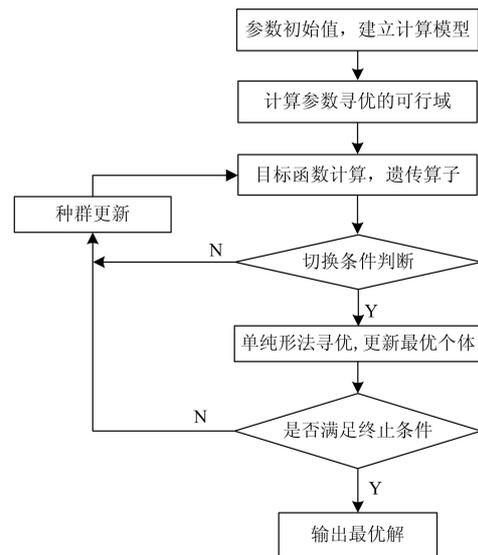


图 3 PI 参数的混合遗传算法优化流程图
Fig. 3 Flowchart of hybrid genetic algorithm

4 算例分析

为了验证本文设计直流输电定电流控制器 PI 参数优化方法的正确性，本文选取 CIGRE HVDC Benchmark 测试系统为研究对象，直流系统参数见文献[13-14]；并假设无功补偿投切及变压器变比调整能够保持系统交流侧电压不变。

4.1 准稳态模型验证

为了验证本文搭建的 Simulink 直流输电准稳态模型的准确性, 将 CIGRE HVDC Benchmark 测试系统的准稳态模型与 PSCAD/EMTDC 电磁暂态模型两者在相同参数条件下的电流阶跃响应作对比。当定电流控制器 PI 参数为 $K_p = 1$ 、 $K_i = 20$ 时直流电流 I_{dc} 及整流侧触发角 α 的阶跃响应对比如图 4 所示。由图可得两种模型的阶跃过程中 I_{dc} 及 α 曲线基本吻合, 因此准稳态模型可用于定电流控制器 PI 参数优化。

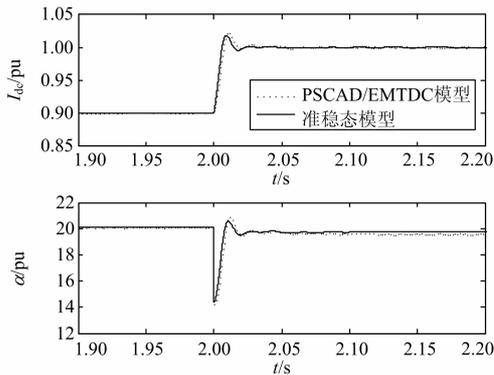


图 4 阶跃响应对比图

Fig. 4 Comparison of step response

4.2 各算法结果比较

本文遗传算法选取的初始种群数为 30; 交叉率为 60%; 变异概率为 5%; 每一代有 90% 的新个体产生。

图 5 为遗传算法 400 代共 10 803 个数据拟合的 K_p 、 K_i 和 J_{ITAE} 指标三维曲面图。由图 5 可知 J_{ITAE} 指标主要受 K_p 影响, 当 $K_p > 1.56$ 后指标变化已不明显, 进化进入相对停滞期, 优化的结果并不随进化代数的增加而改善。若在此时嵌入单纯形法, 可加快进化速度, 其结果见表 1。算法耗时最长的步

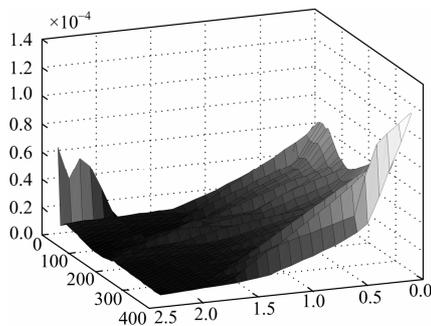


图 5 遗传算法优化过程中目标函数值趋势图

Fig. 5 Objective function value of the optimizing process based on genetic algorithm

表 1 遗传算法和混合遗传算法计算结果比较

Table 1 Result comparison of genetic algorithm and hybrid genetic algorithm

算法类型	t	K_p	K_i	$J_{ITAE}(10^{-6})$	仿真次数
遗传算法	10	1.579 0	17.982 8	4.658 0	273
	50	1.562 6	17.608 9	4.478 8	1 353
	100	1.562 7	17.608 9	4.466 8	2 703
	200	1.563 9	17.631 8	4.466 8	5 403
混合算法	400	1.562 7	17.608 9	4.466 8	10 803
	17	1.562 8	17.609 1	4.439 6	537

骤为模型仿真时间, 由表 1 可得混合遗传算法调用 537 次计算模型即满足收敛条件, 其结果优于遗传算法调用计算模型 2 703 次的结果。嵌入单纯形法的遗传算法优化效率大幅提高。

表 2 为单纯形法选取不同的初值其优化的结果。由表 2 可得, 选取不同的初值其可能收敛于不同的局部最优解, 因此如果仅采用单纯形法优化, 其得到的结果需要进一步分析。

表 2 单纯形法不同初值计算结果比较

Table 2 Result comparison of different initial using simplex method

初值		终值		$J_{ITAE}(10^{-6})$
K_p	K_i	K_p	K_i	
0.500 0	100.00	2.499 6	291.14	9.412 7
1.000 0	20.000	0.944 5	16.626	4.525 5
1.500 0	50.000	2.495 5	140.30	8.454 3
2.000 0	250.00	2.499 7	282.21	9.434 3
2.500 0	150.00	2.339 7	154.19	7.956 9
1.500 0	18.000	1.562 8	17.609	4.465 5

4.3 最优参数仿真实证

为了校验基于准稳态模型经混合遗传算法优化得到的 PI 参数的最优解的可行性, 采用 PSCAD/EMTDC 仿真对所得结果进行验证。由混合遗传算法的最优解设置 PI 参数进行阶跃响应: $t = 5$ s 时使电流参考值升高 10%。整个过程的直流电流阶跃响应曲线如图 6 所示, 图中 I_{dref} 、 I_{meas} 分别为电流参考值与测量值。当整流侧电流整定值发生阶跃变化时, 上升时间 $t_r < 10$ ms, 同时超调量

$M_p < 20\%$, 过渡时间约为 50 ms, 满足动态要求。

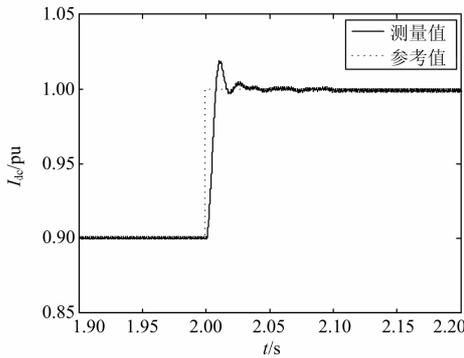


图 6 最优参数对应直流电流阶跃响应图

Fig. 6 Step response of the DC current with optimal parameters

5 结语

(1) 为了克服遗传算法在进化的后期进化缓慢的缺陷, 本文采用在遗传算法渐趋停滞后期嵌入单纯形法, 形成了一种新的混合遗传算法。分别将混合遗传算法、遗传算法及单纯形法运用于直流输电整流侧电流控制器 PI 参数寻优, 得到的结果对比表明混合遗传算法在优化速度及精度方面具有显著的优势。

(2) 考虑到实际直流输电工程复杂性, 为了提高参数优化速度, 采用了准稳态模型这一简化模型, 该模型准确度较高、仿真计算速度快, 可用于直流输电参数优化; PI 参数可行域由基于 PSCAD/EMTDC 仿真的电压稳定性计算得到, 该方法与实际工程结合度较高; 通过对 CIGRE HVDC Benchmark 测试系统的仿真实验验证了本文优化方案的有效性。该方案可行性较好, 对直流输电工程有应用参考价值。

参考文献

[1] ASTROM K J, HAGGLUND T. PID controllers: theory, design, and tuning[M]. New York, USA: Instrument Society of American, 1995.

[2] 史林军, 唐国庆. 基于改进 PSO 算法的 FESS 的 PI 参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 52-57.

SHI Lin-jun, TANG Guo-qing. FESS PI parameter optimization by an improved PSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 52-57.

[3] 李龙, 刘重阳, 贲洪奇. 基于神经元 PI 控制的 PWM 整流器动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 124-128.

LI Long, LIU Chong-yang, BEN Hong-qi. Research of the dynamic characteristics of the PWM converter based on neurons PI control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 124-128.

[4] 胡凯, 申群太. 基于微粒群算法优化 PI 参数的单相有源电力滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 51-56.

HU Kai, SHEN Qun-tai. Single-phase active power filter based on particle swarm optimized PI regulator[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 51-56.

[5] 李远景, 李志雄, 汤双清. 基于单神经元的 VSC-HVDC 控制器设计与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 10-14.

LI Yuan-jing, LI Zhi-xiong, TANG Shuang-qing. Controller design for VSC-HVDC system based on single neuron[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 10-14.

[6] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.

MA Xiu-fan, CUI Huan-jun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.

[7] 孙凤艳, 王友仁, 林华, 等. 基于频域建模与遗传算法的电力电子电路参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 99-104.

SUN Feng-yan, WANG You-ren, LIN Hua, et al. Parameter identification of power electronic circuit based on transfer function model and genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 99-104.

[8] 周正贵. 混合遗传算法及其在叶片自动优化设计中的应用[J]. 航空学报, 2002, 23(6): 571-574.

ZHOU Zheng-gui. Composite genetic algorithm and its application to automatic optimization of turbomachinery blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(6): 571-574.

[9] 郑葆葆. 遗传算法与单纯形法组合的影像纹理分类方法[J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 325-329.

- ZHENG Zhao-bao. Classification of image texture by combination of genetic algorithm and simplex method[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(4): 325-329.
- [10] 杨晓华, 陆桂华, 郦建强. 混合加速遗传算法在流域模型参数优化中的应用[J]. *水科学进展*, 2002, 13(3): 340-344.
- YANG Xiao-hua, LU Gui-hua, LI Jian-qiang. Applications of the hybrid accelerating generic algorithm to parameter optimization of basin model[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(3): 340-344.
- [11] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(12): 33-36.
- ZHOU Chang-chun, XU Zheng. Simulation validity test of the HVDC quasi-steady-state model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(12): 33-36.
- [12] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于 ITAE 指标的 PID 参数整定方法比较研究[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(8): 206-210.
- XU Feng, LI Dong-hai, XUE Ya-li. Comparing and optimum seeking of PID methods base on ITAE index[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(8): 206-210.
- [13] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(5): 135-140.
- WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Parameter calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(5): 135-140.
- [14] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. First benchmark model for HVDC control studies[J]. *Electra*, 1991, 135(1): 54-73.

收稿日期: 2013-08-06

作者简介:

喻 锋(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直流输电及电网安全稳定控制; E-mail: darall@sjtu.edu.cn

王西田(1973-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统机网协调;

杨 煜(1973-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统控制理论及仿真。