

考虑负荷变化影响的综合无功优化并行计算模型

张安安^{1,2}, 杨洪耕², 贺星棋², 杨坤³

(1. 西南石油大学电子信息工程学院, 四川 成都 610500; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;
3. 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 实际综合无功优化中, 保证系统尽量远离可能的崩溃点十分重要。提出基于 ε -支配域并行算法的综合无功优化模型, 通过负荷裕度指标对系统电压稳定性进行评估, 利用基于 ε -支配域的并行计算方法, 解决了单独依靠状态指标难以准确估计系统崩溃点和裕度指标应用到多目标无功优化中导致的速度瓶颈问题, 实现了系统电压稳定水平的实时、全面的评估, 为运行人员提供了更全面的系统信息。通过 IEEE14、IEEE30 和 IEEE118 节点系统验证了所提模型和算法的正确性和有效性。

关键词: 无功优化; 电压稳定; 多目标优化; 原-对偶内点法; 负荷裕度; ε -支配域; Pareto-近似最优解集; 并行计算

Parallel computing model for coordinated reactive power optimization considering load changing

ZHANG An-an^{1,2}, YANG Hong-geng², HE Xing-qi², YANG Kun³

(1. School of Electronic Information Engineering, SWPU, Chengdu 610500, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Sichuan Electrical Power Corporation, Chengdu 610041, China)

Abstract: It is necessary, in reactive power optimization, to have power system to run stable and keep away from voltage collapse as possible. This paper presents a coordinated reactive power optimization model based on a ε -domination parallel algorithm. It calculates load power margin by Primal-dual interior point nonlinear programming, which can assess voltage stability quickly and completely, solve the difficulty in evaluating the voltage collapse point by status indicators only, and provide operators more important information. Simulation results of IEEE 14, IEEE30 and IEEE118 node systems show that the approach is right and efficient.

Key words: reactive power optimization; voltage stability; multi-objective; PDIPM; load margin; ε -domination; pareto-optimal set; parallel computing

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0013-06

0 引言

随着社会经济的不断发展, 电力负荷不断增加, 远方电源供电比重增大, 以致在负荷高峰期传输容量有可能接近极限, 增加了出现电压崩溃并发展成为全网性事故的可能性。因此, 以维持电压合理水平, 降低网络损耗和确保系统电压稳定的多目标无功优化已成为自动电压控制系统的发展趋势。迄今, 国内外学者已在这方面取得了大量有价值的研究成果^[1-13]。文献[1]提出了一种同时考虑系统动态、静态稳定特性的协同控制方法, 对静态电压的评估采用特征值法; 文献[2-5]用不同的多目标优化算法求解综合无功优化问题, 并且都采用常规收敛潮流雅可比矩阵的最小奇异值(MSV)评估系统的静

态电压稳定情况; 文献[6]利用专家系统在综合无功优化中实现提升系统电压稳定裕度的目的; 文献[7-8]则应用粒子群算法求解综合无功优化问题; 文献[6-8]评估系统电压稳定采用的都是L指标。文献[1-8]的综合无功优化都可归入采用状态指标评估系统的电压稳定程度, 具有实现简便, 计算快速的优点, 但状态指标仅能反映系统当前状态的稳定水平, 却无法反映实际电力系统在运行点改变后, 系统是否还能保持稳定; 文献[9-10]的无功优化模型计算出系统在某种负荷增长模式下的功率裕度, 以此为基础进行无功优化或规划, 简化了计算, 但缺乏应对系统变化的灵活性, 所采用的负荷增长模式可能与实际情况相差较大, 同时计算效率不够高, 难以实行实时控制; 文献[11-13]分层处理优化网损和提高稳定裕度目标, 首先以降低网损为目标得到优化解集, 再采用连续潮流法或优化算法评估所得到解的电压稳定裕度, 选取其中稳定裕度最大的解作

基金项目: 四川电网区域无功控制 AVC 重大项目(川电科技[2008]1号文, 6)

为最终解,此方法具有工程上易于实现的优点,但根据多目标寻优理论可知,其解实际上是在前一层所得解集中的局部寻优,很可能不是多目标优化的Pareto最优解,另外计算效率也有待提高。

本文提出根据系统短时负荷预测得到系统可能的负荷变化趋势,由此计算系统负荷稳定裕度作为综合无功优化的电压稳定评估指标;同时,针对由于负荷裕度的引入导致计算耗时过多,提出的基于 ε -支配域的并行算法,具有实现简便,便于扩展的特点。

1 电压稳定指标分析

目前综合无功优化采用的状态指标主要包括:常规收敛潮流雅可比矩阵的最小奇异值(MSV)和L指标。用Kessel提出的L指标^[14]和A. Tiranuchit等人提出的最小奇异值指标^[15]评估系统静态电压稳定水平时,都只需用到系统当前运行状态的信息,计算量小,应用方便,但线性不理想,对电压崩溃点的预测精度也不够精确。图1显示了分别用L指标,最小奇异值法求解IEEE14、IEEE30节点系统电压稳定的情况,计算采用恒功率负荷模型,负荷增长方式采用恒功率因数增长。由图1可见,L指标和MSV线性都不太理想,当系统负荷较轻时,计算结果变化不大,但靠近临界点时值却迅速变化。其中,MSV指标靠近临界点处,值出现“跃变”,这是因为MSV对矩阵的维数敏感,当发电机达到无功出力极限时,PV节点转化为PQ节点,相应的潮流方程的雅可比矩阵将会增加一行和一列。另一方面,虽然L指标的稳定性要优于MSV指标,但由L指标的定义可以推导出:当以L指标评估电压稳定水平求取多目标优化问题的Pareto解集时,所得到的解会使全网电压普遍靠近上限运行(详细推导参见附录)。这样,当希望系统稳定裕度尽量大,同时又希望电网电压维持在适中的水平时,不适合应用L指标。

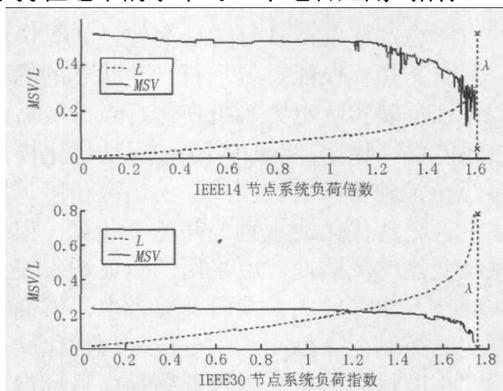


图1 静态电压稳定指标对比

Fig.1 Comparison between L index and MSV for estimating voltage stability

考虑到实际系统负荷是不断变化的,因此希望无功优化用到的电压稳定性指标应具有能够表示系统负荷的变化即运行点变化的能力,相对于上述状态指标,功率裕度指标不仅由于其线性性好,能够提供一种直观的表征系统电压崩溃程度的度量,同时还能够跟踪负荷变化给出系统的电压稳定裕度,因此受到广泛的重视。本文采用文献[16]的负荷裕度指标评估系统的电压稳定程度。根据文献[16],无论是鞍结分岔还是极限诱导分岔,静态电压稳定裕度都可归结为以下的优化问题:

$$\begin{cases} \min & (-\lambda) \\ \text{st.} & \mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{y}_d = 0 \\ & \mathbf{G}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \underline{\mathbf{G}} = 0 \\ & \mathbf{G}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \overline{\mathbf{G}} = 0 \\ & (\mathbf{l}, \mathbf{u}) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\lambda \in \mathbf{R}^1$ 为反应负荷水平的参数; $\mathbf{y}_d \in \mathbf{R}^m$ 为负荷变化方向, m 为等式约束数目; $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda) = [\mathbf{f}_1(\mathbf{x}), \dots, \mathbf{f}_m(\mathbf{x})]^T$ 为扩展潮流方程; $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为状态参数; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为常规潮流方程。 $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = [\mathbf{G}_1(\mathbf{x}), \dots, \mathbf{G}_r(\mathbf{x})]^T$ 为系统不等式约束,包括电压约束和发电机节点有功、无功约束,共 r 个。 $(\mathbf{l}, \mathbf{u}) \in \mathbf{R}^r$ 为松弛变量。式(1)中设 $\lambda = 0$, 对应于初始运行点,显然式(1)的解 λ 反映系统的稳定裕度的大小,也对应着分岔。由式(1)的KKT条件和采用文献[17]的数据格式,式(1)可用式(2)迭代求解:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}) & 0 \\ \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}) & 0 & \mathbf{y}_d \\ 0 & \mathbf{y}_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{L}_{y_0} \\ -\mathbf{L}_{z_0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{H} = \sum_{i=1}^m \nabla^2 \mathbf{h}_i(\mathbf{x}) \mathbf{y}_i + \sum_{i=1}^r \nabla^2 \mathbf{G}_i(\mathbf{x}) (\mathbf{z}_i + \mathbf{w}_i) + \nabla \mathbf{G}(\mathbf{x}) \mathbf{S} \nabla \mathbf{G}(\mathbf{x})^T \\ \mathbf{S} = \mathbf{U}^{-1} \mathbf{W} - \mathbf{L}^{-1} \mathbf{Z} \\ \mathbf{M} = \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}) \mathbf{y} + \nabla \mathbf{G}(\mathbf{x}) [\mathbf{U}^{-1} \mathbf{W} \mathbf{L}_{z_0} - \mathbf{L}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{L}_{z_0} - \mu (\mathbf{U}^{-1} - \mathbf{L}^{-1}) \mathbf{e}] \end{cases}$$

其中: $\nabla^2 \mathbf{h}_i(\mathbf{x})$ 与 $\nabla^2 \mathbf{G}_i(\mathbf{x})$ 为 $\mathbf{h}_i(\mathbf{x})$ 与 $\mathbf{G}_i(\mathbf{x})$ 的 Hessian 矩阵; $(\mathbf{L}, \mathbf{U}, \mathbf{Z}, \mathbf{W}) \in \mathbf{R}^{r \times r}$, 为对角元素为 $(\mathbf{l}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \mathbf{w})$ 的对角阵; $\mathbf{E} = [\mathbf{1} \dots \mathbf{1}]^T \in \mathbf{R}^r$ 。详细的求解过程参见文献[16, 17], 求出崩溃点后可用以下判据来确定系统的分岔类型: 1) 如果系统中所有发电机在分岔处都不满足式(3), 则为鞍结分岔; 2) 如果系统中至少有 1

台发电机在分岔处满足式(3), 则为极限诱导分岔。式(3)中, $Q_{lim,i}$, $V_{s,i}$ 分别为发电机节点 i 的无功极限和端电压设定值。

$$\begin{cases} Q_{lim,i} - Q_i = 0 \\ V_{s,i} - V_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

2 综合无功优化模型设计

2.1 ε -支配域并行计算算法

由于负荷裕度的计算量相对于状态指标而言大大增加, 因此还鲜有研究将其直接用作多目标优化的适应度评估函数。本文将基于 ε -支配域的 eMOEA 算法^[2,18]改进为并行算法, 来解决引入负荷裕度计算的时间瓶颈问题。eMOEA 算法能在大幅提高多目标优化速度的同时得到良好分布的 Pareto 优化结果。其思想是: 在寻优空间中对两个解进行支配关系比较时, 当两个解的第 i 维目标之差小于 ε_i 时, 认为这两个解对目标 i 而言没有差异。如图 2, 假设有一二维目标矢量 $a(f_1, f_2)$, 由 ε 支配域思想 a ε -支配于空间 $A \cup B$, 而由普通支配域定义, 矢量 a 支配于空间 B 。显然, ε -支配域目标空间的复杂度要低于普通支配域的目标空间复杂度。从物理意义上解释, ε_i 反映了对目标函数 f_i 的“容忍度”。

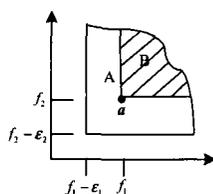


图 2 ε -支配域图形说明

Fig.2 Illustration of ε -domination concept

eMOEA 算法的比较复杂度为 $O(2MN)$ ^[2], 但当优化目标或约束条件本身计算很复杂时, 算法整体计算复杂度也将增加, 由于 eMOEA 算法采用“串行”计算模式, 其计算复杂度将是每个目标适应度计算的叠加。因此, 将算法适应度计算改为“并行”计算模式, 则该部分的计算复杂度将仅等于适应度计算中复杂度最大的一项。针对本文应用, 实现并行计算需解决几个关键问题: 1) 尽量简化共享数据规模, 简少数据交互负担; 2) 尽量均衡分配各并行计算线程计算量; 3) 保证各并行计算线程数据和结果时间上同步。

当负荷裕度计算采用直角坐标扩展潮流方程时, $\nabla^2 h_i(x)$ 与 $\nabla^2 G_i(x)$ 都是仅与电网结构有关的高度稀疏的常数对称矩阵, 因此可采用稀疏存储技术

保存上三角阵的元素, 不用每次迭代重新计算。这样, 负荷裕度目标的计算量得到减少, 可以用两个线程分别计算负荷裕度和网损。线程间只共享母线、线路和发电机等系统参数, 数据交互由全局变量完成, 只有两个线程都执行完成时主程序才继续执行, 避免了大量的数据通讯, 保证了线程数据和结果的同步。并行计算流程图如图 3。

并行计算中, 加速比和效率是对并行方案和程序进行评价的重要指标。加速比定义为: 单个节点上的运行时间和 P 个节点上运行时间的比; 并行效率的定义为: 加速比和计算节点个数之比^[19]。因此可推得本文算法并行效率的近似公式(4)。其中, R 是与数据交互和计算速度有关的比例常数; p 是 CPU 处理器核数; n 为系统规模; s 是参与计算矩阵的稀疏度。因此, 在 CPU 核数一定时, 系统规模越大, 并行效率越高。

$$\eta = \frac{1}{1 + 2R \cdot p \cdot (p-1)/(n \cdot s)} \quad (4)$$

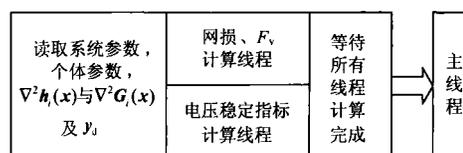


图 3 并行计算流程图

Fig.3 Flow chart of parallel computing

并行 eMOEA 算法流程为:

- 1) 载入电网参数及 eMOEA 算法参数;
- 2) 生成初始种群 P , 并行计算每个个体的目标函数值; 并将 P 的 ε -非支配集作为初始存档种群 E ;
- 3) 从 P 中随机选出两个个体 (优化解), 将其其中占支配地位的个体与从 E 中随机选择的个体进行交叉, 生成子代个体 c , 再并行计算 c 的目标函数值;
- 4) 将 c 与 P 中的每个个体进行比较, 如果 c 支配于任一个体, 则用 c 替换该个体, 否则不接收 c ; 同时, 将 c 与 E 中的每个个体进行比较, 如果 c ε -支配于任一个体, 则用 c 替换该个体, 否则不接收 c ;
- 5) 如果未达到迭代次数, 则到步骤 2), 否则输出 E 。

2.2 模型数学表达式

本文综合无功优化模型如式(5)。

$$\begin{cases} \text{Min } (P_{\text{loss}}, F_v, -\lambda) \\ \text{st. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{y}_d(t) = 0 \\ \underline{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \overline{\mathbf{g}}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： P_{loss} 为系统有功网损； F_v 为节点电压偏差指标，数学表达式如式(6)； λ 为负荷裕度。其中 \mathbf{y}_d 为式(7)所示的负荷变化矢量，反映了系统负荷在 t 时刻可能的变化趋势， $\mathbf{P}(t+\Delta t)$ 为系统在 $t+\Delta t$ 时刻的负荷矢量，其值可由短时负荷估计等方式得到， $\mathbf{P}(t)$ 为当前时刻负荷实际值，为了保证算法的收敛性， Δt 不宜取太大； $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为潮流方程约束， $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda)$ 为扩展潮流方程约束， $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为不等式约束，包括变压器档位限制，节点电压幅值限制，发电机无功出力限制，补偿电容器无功容量以及发电机端电压限制，详细表述同文献[2]。

$$F_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(V_i) \quad (6)$$

$$\text{其中, } F(V_i) = \begin{cases} 0 & (V_{L1} \leq V_i \leq V_{U1}) \\ 1 - \frac{V_{U0} - V_i}{V_{U0} - V_{U1}} & (V_{U1} < V_i \leq V_{U0}) \\ 1 - \frac{V_i - V_{L0}}{V_{L1} - V_{L0}} & (V_{L0} \leq V_i < V_{L1}) \\ 1 & (\text{others}) \end{cases}$$

$$\mathbf{y}_d(t) = \mathbf{P}_f(t + \Delta t) - \mathbf{P}(t) \quad (7)$$

3 算例分析

由于本文方法求解的是 Pareto 近似解集，单独比较单个解的值不能反映所用方法对优化结果的影响，所以设计以下四种算法(表 1)，其中方法 A 为本文所采用方法，并比较其 Pareto 解集各目标的平均值和标准方差，优化目标重要程度关系根据“安全第一、经济第二”的原则依次为：1) 负荷裕度；2) 电压偏差；3) 网损。

表 1 算法列表

Tab.1 List of approaches to be compared

	电压稳定指标(求解方法)	计算模式
方法 A	负荷裕度(PDIPM)	并行
方法 B	负荷裕度(PDIPM)	串行
方法 C	L	并行
方法 D	MSV	并行

在IEEE14,30,118节点系统上进行计算，系统各节点负荷特性分为四类：①行政办公、商业金融、文化娱乐、体育用地；②医疗卫生、教育科研；③居住用地；④工业；典型曲线如图4所示。本文中在每整点算法计算一次，实际应用中可根据需要灵活设定计算间隔，每次计算采用超短期或短期负荷预测的结果作为下一时刻负荷量。并行eMOEA算法各参数取值同文献[2]， $\varepsilon_i=0.001(i=1,2,3)$ ，进化代数 2 000，参与比较的算法采用的随机数 R_n 列于表格左上角。所有算法用VC++6.0环境编写，所用计算机CPU为双核2.2 GHz，3 G内存。表2列出了IEEE30节点系统用方法A, C, D在11点的优化结果，为了便于比较，每个解都计算了L指标。每列中第一项数据为平均值，第二项为标准差，黑体字标出的是各项指标的最优值。

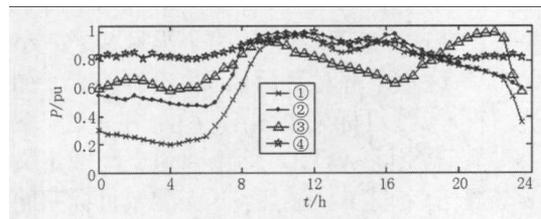


图 4 典型日负荷曲线

Fig. 4 Typical daily load curve

表 2 方法 A、C、D 计算结果(IEEE30)

Tab.2 Results of approaches of A, C and D(IEEE30)

$R_n=0.1432$	P_{loss}	F_v	L	λ
初始值	0.085	0.581	0.164	0.77
A	0.066/0.025	0.015/0.032	0.153/0.002	1.565/0.396
C	0.040/0.019	0.140/0.106	0.142/0.004	0.696/0.495
D	0.044/0.006	0.043/0.066	0.152/0.002	0.971/0.707

由表 2 可见，电压稳定裕度和电压偏差量两项指标使用方法 A 所得结果都是最好的；方法 C 所得到的网损最小但电压偏差度最差，并且解集节点电压普遍靠电压上限，加大的设备的绝缘要求及老化程度。根据各目标的重要程度关系，方法 A 的优化结果综合性能更好，并且结合公式(3)可以判定系统可能的分岔是鞍结分岔。表 3, 4 是 11 点时 IEEE14,118 节点系统的计算结果，方法 A 的优化结果都要好于方法 C、D，并且方法 A 对负荷裕度优化的同时，L 指标也得到了优化，而方法 C、D 优化了 L 指标，却有可能降低系统的负荷裕度。24 个时刻的计算结果表明，方法 A 都是优于另两种方法，因此可以认为负荷裕度指标更适合用于考虑电压稳定的综合无功优化 Pareto 解集的求取。

表3 方法A、C、D计算结果(IEEE14)

Tab.3 Results of approaches of A, C and D(IEEE14)

$R_n=0.1325$	P_{loss}	F_v	L	λ
初始值	0.153	0.73	0.089	0.902
A	0.089/0.003	0.056/0.06	0.082/0.001	1.176/0.312
C	0.092/0.004	0.066/0.054	0.078/0.002	0.43/0.209
D	0.091/0.002	0.055/0.004	0.086/0.002	0.727/0.228

表4 方法A、C、D计算结果(IEEE118)

Tab.4 Results of approaches of A, C and D(IEEE118)

$R_n=0.2142$	P_{loss}	F_v	L	λ
初始值	1.318	0.381	0.079	1.698
A	1.266/0.05	0.045/0.031	0.074/0.03	1.843/0.28
C	1.258/0.02	0.062/0.018	0.067/0.001	1.142/0.15
D	1.255/0.024	0.056/0.013	0.069/0.00	1.14/0.137

图5是A、B两种方法计算时间的比较。方法A与方法B相比在计算速度上的提升是明显的,前者计算时间分别为后者的85.5%, 63.2%, 47.2%,随着系统规模的增加,并行算法计算效率的提高也随之增大,这与公式(4)结果是相符的。



图5 方法A、B计算耗时对比(s)

Fig. 5 Computing time of approach A and B(s)

4 结论

(1) 目前在多目标无功优化中广泛应用的电压稳定状态指标(最小奇异值和L指标),由于线性不理想,难以准确估计崩溃点,Pareto寻优能力不强。特别是L指标得到的解会使全网电压普遍靠近上限运行。

(2) 本文采用的考虑负荷变化影响的综合无功优化模型所得的结果既能考虑系统当前电压稳定性,又能反映实时负荷增长方式下系统的负荷裕度和可能崩溃类型。

(3) 提出的 ε -支配域并行算法,实现简便,解决了将负荷裕度指标应用到无功优化中的时间瓶颈问题,同时可以根据优化目标的数目和类型灵活增加或减少线程,结合当前计算机多核化的发展趋势,应用前景广阔。

参考文献

[1] Popovic, Dragana H. Optimal voltage security control of

power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002, 24 (4): 305-320.

[2] 张安安, 杨洪耕. 基于 ε -支配域的模糊多目标无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (5): 34-39.

ZHANG An-an, YANG Hong-geng. A new ε -domination based fuzzy multi-objective reactive power optimization approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (5): 34-39.

[3] 熊虎岗,程浩忠,李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (11): 102-108.

XIONG Hu-gang, CHENG Hao-zhong, LI Hong-zhong. Multi-objective reactive power optimization based on immune algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (11): 102-108.

[4] 王勤, 方鹤飞. 考虑电压稳定性的电力系统多目标无功优化[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 31-34.

WANG Qin, FANG Ge-fei. Multi-objective reactive power optimization considering voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (3): 31-34.

[5] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22 (12): 146-151.

FENG Shi-gang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting genetic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (12): 146-151.

[6] Narendranath Udupa A, Thukaram D, Parthasarathy K. An expert fuzzy control approach to voltage stability enhancement[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1999, 21 (4): 279-287.

[7] ZHANG Wen, LIU Yu-tian. Multi-objective reactive power and voltage control based on fuzzy optimization strategy and fuzzy adaptive particle swarm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30 (9): 525-532.

[8] 刘佳, 李丹, 高立群. 多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (31): 22-28.

LIU Jia, LI Dan, GAO Li-qun. Vector evaluated adaptive particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (31): 22-28.

[9] Chattopadhyay D, Chakrabarti B B. Reactive power planning incorporating voltage stability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2002, 24 (3): 185-200.

[10] 刘明波, 杨勇. 计及静态电压稳定约束的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (5): 21-25.

LIU Ming-bo, YANG Yong. Optimal reactive power planning incorporating steady state voltage stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (5) : 21-25.

[11] de souza A C Z, Honorio L M, Torres G L. Increasing the loadability of power systems through optimal-local-control actions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (1) : 188-194.

[12] He R, Taylor G A, Song Y H. Multi-objective optimal reactive power flow including voltage security and demand profile classification[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30 (5) : 327-336.

[13] 刘明波, 曲绍杰, 马冠雄. 含静态电压稳定裕度约束的无功优化[J]. 华南理工大学学报, 2009, 37 (2) : 107-112.

LIU Ming-bo, QU Shao-jie, MA Guan-xiong. Reactive power optimization with constraints of static voltage stability margin[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37 (2) :107-112.

[14] Kessel P, Glavitsch H. Estimating the voltage stability of a power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, PWRD1 (3) : 346-354.

[15] Tiranuchit A, Thomas R J. A posturing strategy against voltage instabilities in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3 (1) : 87-93.

[16] 李华强, 刘亚梅, Yorino N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25

(24) : 56-60.

LI Hua-qiang, LIU Ya-mei, YORINO N. Voltage stability assessment for saddle node bifurcation and limit induced bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (24) :56-60.

[17] Wei H, Sasaki H, Kunbkawa J et al. An interior point programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (3) : 870-877.

[18] Deb K, Mohan M, Mishra. Evaluating the ϵ -domination based multi-objective evolutionary algorithm for a quick computation of pareto-optimal solutions[J]. Evolutionary Computation, 2005, 13 (4) : 501-525.

[19] 刘劲松, 刘福田, 刘俊. 地震层析成像 LSQR 算法的并行化[J]. 地球物理学报, 2006,49 (2) : 540-545.

LIU Jin-song, LIU Fu-tian, LIU Jun. Parallization of LSQR algorithms used in seismic tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006,49 (2) : 540-545.

收稿日期: 2009-09-16; 修回日期: 2009-11-26

作者简介:

张安安 (1977-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电压稳定与控制; E-mail: ananzhang@yahoo.cn

杨洪耕 (1949-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量、电压稳定与控制;

贺星棋 (1978-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统稳定及运行。

(上接第 12 页 continued from page 12)

[5] Palsson M P, Toftveaag T, Uhlen K, et al. Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks[C]. //Power Engineering Society Summer Meeting. 2002: 762-769.

[6] 吴俊玲, 吴畏, 周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 59-63.

WU Jun-ling, WU Wei, ZHOU Shuang-xi. Study on SMES unit for improving the stability of power system connected with wind farms[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(3) : 59-63.

[7] Zhou F, Joos G, Abbey C, et al. Use of large capacity SMES to improve the power quality and stability of wind farms[C]. // Power Engineering Society General Meeting. 2004: 2025 - 2030.

[8] WANG Hai-feng. The "Third-Category" method and multi-agent system theory in power system applications[C]. //IEEE General Meeting. San Francisco (USA): 2005.

[9] 陈中, 杜文娟, 王海风, 等. 电压稳定后紧急控制多代理系统框架[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (12) : 33-37.

CHEN Zhong, DU Wen-juan, WANG Hai-feng, et al. Framework of multi-agent system in post-emergency voltage stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (12) : 33-37.

收稿日期: 2009-10-09; 修回日期: 2009-11-12

作者简介:

陈中 (1975-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定运行与控制, FACTS 的应用研究; E-mail: chenzhong_seu@163.com

高山 (1974-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定运行与控制, FACTS 的应用研究;

王海风 (1960-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析和控制。