

用于提高电压稳定裕度的 发电机无功出力管理

苏永春,程时杰,文劲宇

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 电力系统电压稳定裕度大小与系统无功储备相联系,研究了通过管理系统发电机的无功出力来提高系统的电压稳定裕度。把重新安排系统无功出力形成一个优化问题,采用伪梯度进化算法(PGEP)寻求全局的最优解,在搜索过程中利用模式分析技术指导寻优方向。对新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真分析表明,与常规进化算法(SEP)相比,所提出的方法具有更快的收敛速度与更好的寻优能力,能够增加系统的无功储备,同时减少系统的有功及无功损耗,在不增加新设备及不改变系统有功分布的情况下使系统的电压稳定裕度得到明显提高。

关键词: 电力系统; 电压稳定裕度; 伪梯度进化算法; 模式分析

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0039-04

0 引言

近年来,电压稳定问题得到了越来越多的关注。由于电力需求的不断增长及系统互连,受经济和环境的制约,使电力系统运行于越来越接近传输极限的状态,电压稳定问题日益突出。电压失稳可能由系统扰动或由系统故障引起,无论其原因如何,一个共同的特征是,系统无功储备迅速丧失。

电力系统的电压稳定性同系统动态无功储备密切相关,电压崩溃与系统中的无功需求得不到满足相联系,其原因包括无功生产和传输所受到的限制。系统中发电机无功储备的大小是电压稳定一个量度,在过去,系统的运行人员常利用发电机无功储备状况判断系统的电压稳定性,关键发电机的无功储备是许多实际的在线电压稳定监视的对象^[1]。

利用电压稳定与系统无功储备相联系的思想,研究人员在这方面开展了一些研究工作。文献[1-4]研究了系统的无功储备与电压稳定性的定量关系。文献[5]中同时调整系统的有功及无功分布来满足电压稳定准则,应用该方法对于系统的运行方式会产生较大的影响。文献[6]中利用无功电源的重新安排来改善系统的电压稳定性,但它没有考虑对于有功损耗的影响,同时无法保证计算结果是全局最优解。

这里把无功储备的管理问题形成一个优化问题,通过重新安排发电机的无功注入来增加发电机的无功储备,从而提高系统的电压稳定性,同时不改变有功分布,优化的目标是使发电机的无功储备最大及有功损耗最小。对优化问题的求解采用伪梯度进化算法(PGEP),利用进化算法的搜索能力与鲁棒

性求最优解,加入传统梯度方法的思想改善算法的收敛速度,搜索过程沿着模式参与因子提供的方向,算例分析表明,所提出的方法可以有效地提高系统的电压稳定裕度,同时减少有功损耗。

1 无功储备优化

1.1 目标函数的数学模型

电力系统的电压稳定性可以用电压稳定裕度的大小表示,电压稳定裕度通常表示为当前运行点与最大系统运行点的距离,以有功功率的大小或百分比表示。系统的最大运行点对应于 PU 曲线的鼻尖点,考虑某种给定的负荷增长方式和发电分配方式时, PU 曲线可以通过连续潮流法或延拓潮流算法得到。下面在计算电压稳定裕度时采用 PU 曲线的方法。

对于发电机的模式分析表明,按照系统各发电机的有功参与因子提供的方向来调整发电机的无功出力可以改善系统的电压稳定性。按照这种思想,为了使发电机的无功储备最大(等价于无功出力最小),同时考虑减少系统的有功损耗,构造的目标函数如式(1)所示:

$$F = \text{Min}(W_1 \sum Q_{Gi} + W_2 P_{\text{LOSS}}) \quad (1)$$

式中 Q_{Gi} 为第 i 台发电机无功发电量, $i=1, 2, \dots, N_G$, N_G 为系统中发电机总数; W_1 、 W_2 为权重系数; P_{LOSS} 为系统有功功率损耗。

上述优化问题的约束条件为

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i \in N \quad (2)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$U_{i\max} > U_i > U_{i\min} \quad i \in N \quad (3)$$

$$Q_{Gi\max} > Q_{Gi} > Q_{Gi\min} \quad i \in N_G \quad (4)$$

$$T_{i\max} > T_i > T_{i\min} \quad i \in N_T \quad (5)$$

式(2)为潮流约束,其中 P_i 、 Q_i 为节点注入功率; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵对应元素; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的电压相角差; U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; N 为系统的节点总数。式(3)(4)(5)为限值约束,其中 U_{imax} 、 U_{imin} 为节点电压的上、下限; Q_{Gimax} 、 Q_{Gimin} 为发电机节点无功容量的上、下限; T_{imax} 、 T_{imin} 为变压器支路分接头的上、下限。

1.2 伪梯度进化算法

优化问题(1)本质上是一个混合优化问题,传统的梯度方法在解决这类问题时效果不佳。进化算法(EA)在近年来的应用表明该算法可以成功处理混合优化问题^[7-11]。进化算法属于随机搜索算法,在寻求全局最优解时具有很强的鲁棒性。但其显著缺点是计算时间过长,从而限制了该方法的应用。相反,基于梯度的方法收敛速度很快,但这类方法用于处理多峰值函数时可能收敛于局部解。近来有研究表明采用进化算法和梯度方法相结合可以产生需要的寻优能力和收敛速度^[12]。

1.2.1 伪梯度

对于一个 n 维参数优化问题,当目标函数可微时其梯度 $\vec{g}$ 可以表示为

$$\vec{g}(\vec{x}) = \nabla f(\vec{x}) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^T \quad (6)$$

梯度总是指明目标函数变化最剧烈的方向和数值,这是梯度方法非常重要的特征。利用常规梯度方法的该特点,定义伪梯度 $\vec{g}_p$ 如下:

当 $f(\vec{x}_k) < f(\vec{x}_{k-1})$, 移动为“下山”,从 $\vec{x}_{k-1}$ 到 $\vec{x}_k$ 的移动定义为正,伪梯度 $\vec{g}_p(\vec{x}_k)$ 定义为

$$\vec{g}_p(\vec{x}_k) = (\text{dir}(x_{k,1}), \text{dir}(x_{k,2}), \dots, \text{dir}(x_{k,n}))^T \quad (7)$$

$$\text{dir}(x_{k,i}) = \begin{cases} 1 & x_{k,i} > x_{k-1,i} \\ 0 & x_{k,i} = x_{k-1,i} \\ -1 & x_{k,i} < x_{k-1,i} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

当 $f(\vec{x}_k) \geq f(\vec{x}_{k-1})$ 时,变化方向定义为负,伪梯度 $\vec{g}_p(\vec{x}_k)$ 表示为

$$\vec{g}_p(\vec{x}_k) = 0 \quad (9)$$

与常规梯度方法得到梯度的方式相同,伪梯度 $\vec{g}_p$ 可以根据搜索空间的最近 2 个点确定一个好的搜索方向。从上面的定义可以看出,当 $\vec{g}_p(\vec{x}_k) \neq 0$ 时,伪梯度 $\vec{g}_p(\vec{x}_k)$ 总是指出使最小化问题获得更好的解的方向。当 $\vec{g}_p(\vec{x}_k) = 0$ 时,表明此时的方向需要改变。对于常规的进化算法(SEP),所有的搜索方向都是随机的。伪梯度方法的优点是它可以给出一个好的搜索方向而不要求目标函数可微,当在 EA 中采用伪梯度 $\vec{g}_p$ 时,EA 仍然是不依赖于求解问题而独立的,这是 EA 方法的重要特性。

1.2.2 伪梯度进化算法

在常规进化算法中,父代通过变异生成子代,变异过程表示如下:

$$\vec{x}_{(k+m),i}^t = \vec{x}_{k,i}^t + N(0, \sigma_k^t) \quad i=1, \dots, n; k=1, \dots, m \quad (10)$$

式中 $\vec{x}_{k,i}^t$ 为第 t 代群体中的第 k 个个体 $\vec{x}_k^t$ 的第 i 个

元素; m 为群体规模; $N(0, \sigma_k^t)$ 是均值为 0、方差为 σ_k^t 的高斯分布变量。

引入式(7)和(9),用 $\vec{x}_{k,i}^t$ 和 $\vec{x}_{(k+m),i}^t$ 分别代替式中的 $x_{k-1,i}$ 和 $x_{k,i}$,即可计算个体 $\vec{x}_k^t$ 的伪梯度。为了启动计算过程,初始群体中的个体 $\vec{x}_k^0$ 的伪梯度通过模式分析给出,这将在第 1.3 部分中说明。新的变异过程如下:

$$\vec{x}_{(k+m),i}^t = \begin{cases} \vec{x}_{k,i}^t + \text{dir}(\vec{x}_{k,i}^t) | N(0, \sigma_k^t) | & \vec{g}_p(\vec{x}_k^t) \neq 0 \\ \vec{x}_{k,i}^t + N(0, \sigma_k^t) & \vec{g}_p(\vec{x}_k^t) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

PGE 的其他操作与 SEP 相同。通过引入伪梯度概念,算法的收敛性得到显著改善。

1.3 模式分析

模态分析方法可以提供电压稳定关键区域,同时可以给出用以提高电压稳定裕度的预防/校正措施^[13],这些是通过求出雅克比矩阵的关键特征值与特征向量来完成的。线性化系统潮流方程得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PU} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 ΔP 、 ΔQ 分别为母线有功、无功注入变化量; $\Delta \theta$ 、 ΔU 分别为母线电压相角、幅值变化量。

对方程进行解耦分析,分别令 $\Delta P=0$ 及 $\Delta Q=0$ 得到如下方程:

$$\Delta \theta = J_{RP\theta}^{-1} \Delta P, \quad \Delta U = J_{RQU}^{-1} \Delta Q \quad (13)$$

式中 $J_{RP\theta}$ 和 J_{RQU} 为压缩的有功和无功雅克比矩阵。

对矩阵 $J_{RP\theta}$ 进行模式分析,定义有功参与因子 APF 为

$$\text{APF} = \xi \cdot \eta \quad (14)$$

式中 ξ 和 η 是与关键特征值(该特征值在 PU 曲线的鼻尖点值为 0)相对应的左特征向量和右特征向量;符号“ $\cdot$ ”表示对向量 ξ 和 η 进行点乘。

与 PU 母线相对应的有功参与因子 APF_{PU} 给出了有关电压稳定有用信息。文献[14]的分析表明,连接在具有较小 APF 值的母线上的发电机应当注入较多的无功来提高电压稳定裕度,反之亦然。

根据以上分析,可以利用模式分析的结果指导 PGE 方法的搜索方向。定义初始群体中个体 k 的初始搜索方向为

$$\text{dir}(x_{k,i}^0) = \begin{cases} 1 & \text{APF}_{PUi} < \overline{\text{APF}_{PU}} \\ 0 & \text{APF}_{PUi} = \overline{\text{APF}_{PU}} \\ -1 & \text{APF}_{PUi} > \overline{\text{APF}_{PU}} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N_{PU} \quad (15)$$

式中 APF_{PUi} 为母线 i 的有功参与因子; $\overline{\text{APF}_{PU}}$ 为所有 PU 母线的 APF 平均值; N_{PU} 为 PU 母线总数。

2 算例分析

为了测试 PGE 方法对于提高电压稳定裕度的效果,应用该方法对新英格兰 10 机 39 节点系统进行了仿真,系统的结构图如图 1 所示,系统数据参见文献[15]。

图 2 中给出了优化前、后系统的 PU 曲线,从图中可以看出,系统的电压稳定裕度从优化前的 78 %

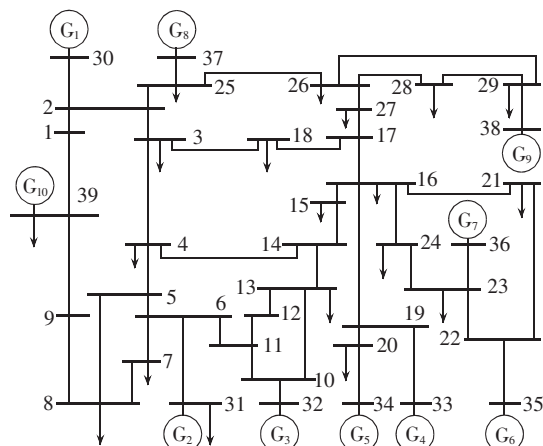


图 1 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.1 New England 10-generator 39-bus power system

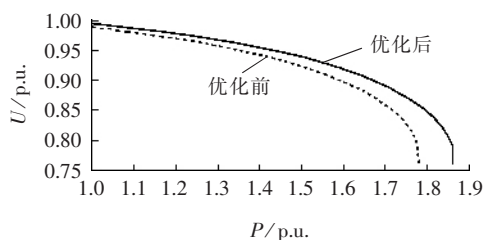


图 2 优化前后 PU 曲线

Fig.2 PU curves before and after optimization

提高到 86%, 大约提高了 8%, 由于优化是在没有添加新设备情况下进行的, 同时也没有改变系统的有功分布, 因此优化效果还是很显著的。

图 3 给出了分别采用 PGEP 和 SEP 方法进行优化时系统的发电机无功出力情况 (图中 $Q_{G\Sigma}$ 为发电机无功总输出, a 为迭代次数, 下同), 可以看出, 由于在 PGEP 中引入了常规梯度方法的思想, 并且在优化过程中采用模态分析方法提供的搜索方向, 因而 PGEP 方法的优化效果无论是从收敛特性还是寻优能力上均优于 SEP 方法。经过优化后的系统发电机无功出力减少了大约 10%, 因而相应地提高了系统的电压稳定裕度。

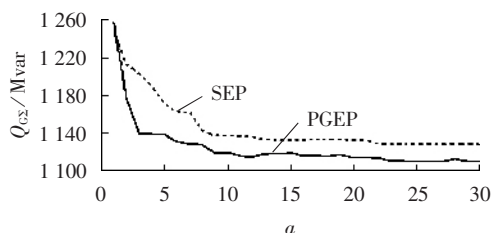


图 3 PGEP 和 SEP 法进行优化的比较

Fig.3 Comparison between PGEP and SEP

图 4 给出了在优化迭代过程中系统的有功损耗变化情况, 由图中可见, 优化过程在提高系统电压稳定裕度的同时也减小了系统的有功损耗。图 5 给出了系统的线路无功损耗及线路电容效应产生的无功功率变化情况, 可以看出, 优化一方面减小了系统的无功损耗, 另一方面增加了线路产生的无功功率, 从而导致发电机无功出力的减小。

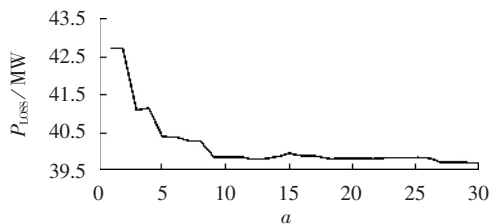


图 4 有功损耗的变化

Fig.4 Variation of system active power loss

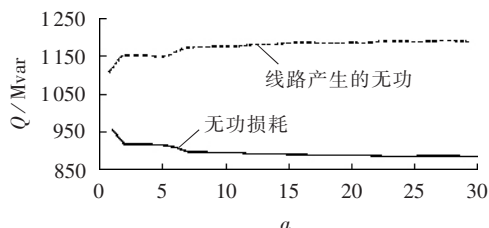


图 5 线路无功损耗与产生的无功

Fig.5 Line reactive power loss and shunt generation

3 结语

利用电压稳定裕度与系统无功储备相联系的思想, 通过管理系统发电机的无功出力来提高系统的电压稳定裕度。把重新安排系统无功出力形成一个优化问题, 引入常规梯度方法的思想, 采用伪梯度进化算法寻求全局的最优解, 在搜索过程中利用模式分析技术指导寻优方向。通过对新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真分析表明, 与常规进化算法相比, 所提出的方法具有更快的收敛速度与更好的寻优能力, 能够增加系统的无功储备, 同时减少系统的有功及无功损耗, 在不增加新设备及不改变系统有功分布的情况下使系统的电压稳定裕度得到明显提高。

参考文献:

- [1] BAO L X, HUANG Z Y, XU W. Online voltage stability monitoring using var reserves[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1461-1469.
- [2] 唐寅生. 电力系统无功电压调控装置控制策略[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(6): 34-36.
TANG Yin-sheng. Control strategy of voltage and reactive power conditioning device in electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(6): 34-36.
- [3] 王亮, 刘玉田, 栾兆文. 基于功率传输路径的在线电压稳定性评估新方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 27-31.
WANG Liang, LIU Yu-tian, LUAN Zhao-wen. New method for on-line voltage stability assessment based on power transmission paths[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 27-31.
- [4] 李宏仲, 金义雄, 程浩忠, 等. 基于改进粒子群优化算法并计及静态电压稳定性的电力系统无功规划[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 50-55.
LI Hong-zhong, JIN Yi-xiong, CHENG Hao-zhong, et al. Reactive power planning based on improved particle swarm optimization with static voltage stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 50-55.
- [5] AFFONSO C M, SILVA L C, LIMA F G, et al. MW and Mvar management on supply and demand side for meeting voltage

- stability margin criteria[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3):1538-1545.
- [6] MENEZES T V, SILVA L C, COSTA V F. Dynamic VAR sources scheduling for improving voltage stability margin[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2):969-971.
- [7] WU Q H, MA J T. Power system optimal reactive power dispatch using evolutionary programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3):1243-1249.
- [8] 王绍部, 龚庆武, 舒乃秋, 等. 基于进化算法的模糊抗差理论在输电线路故障定位中应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3):44-47.
- WANG Shao - bu, GONG Qing - wu, SHU Nai - qiu, et al. Application of evolutionary algorithm based fuzzy robust theory in transmission line fault locating[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3):44-47.
- [9] 王建学, 王锡凡, 陈皓勇. 基于协同进化法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9):124-129.
- WANG Jian - xue, WANG Xi - fan, CHEN Hao - yong. Reactive power optimization based on cooperative coevolutionary approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9):124-129.
- [10] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 量子进化算法在输电网扩展规划中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(17):19-23.
- HOU Yun - he, LU Li - juan, XIONG Xin - gen, et al. Application of quantum - inspired evolutionary algorithm in transmission network expansion planning[J]. Power System Technology, 2004, 28(17):19-23.
- [11] 李军, 邓清华, 丰镇平. 基于进化算法的压气机叶型多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10):205-209.
- LI Jun, DENG Qing - hua, FENG Zhen - ping. Multiobjective

- optimization design of a compressor airfoil using evolutionary algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10):205-209.
- [12] WEN J Y, WU Q H, TURNER D R, et al. Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2):1115-1122.
- [13] GAO B, MORISON G K, KUNDUR P. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4):1529-1542.
- [14] DASILVA L C P, WANG Y, DACOSTA V F, et al. Assessment of generator impact on system power transfer capability using modal participation factors[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5):564-570.
- [15] WANG H F, LI H, CHEN H. Application of cell immune response modeling to power system voltage control by STATCOM[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1):102-107.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

苏永春(1973-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定性(E-mail: ychunsu@163.com);

程时杰(1945-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 研究领域为电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用、低压电力线载波通信、超导电力等(E-mail: sjcheng@hust.edu.cn);

文劲宇(1970-), 男, 湖南常德人, 教授, 博士研究生导师, 研究领域为电力系统运行与控制、储能技术、电力电子等(E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn)。

Reactive power generation management for improvement of voltage stability margin

SU Yong - chun, CHENG Shi - jie, WEN Jin - yu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Power system VSM(Voltage Stability Margin) relates to the reactive power reserves in power network. Improvement of VSM using reactive power generation management of system generators is studied. The management of var generation is formulated as an optimization scheme and PGE (Pseudo - Gradient Evolutionary Programming) is used to obtain the optimal solution, in which modal analysis technique guides the searching direction. Simulation results of New England 10 - generator 39 - bus system demonstrate that, compared with SEP(Standard Evolutionary Programming), the proposed method performs better in convergence speed and searching ability. With the optimal reactive power rescheduling, the reactive power reserves of system is increased and both the active and reactive power losses decreased, system VSM is thus obviously improved without adding new var compensation equipment and changing active power distribution.

Key words: power system; voltage stability margin; pseudo - gradient evolutionary programming; modal analysis

书 讯

《电力电测数字仪表原理与应用指南》由湖南大学任致程老师编写, 全书共分 8 章, 以上海安科瑞电气有限公司产品为素材, 介绍了电力电测数字仪表常用显示器件、专用芯片、电路原理、软件设计方案、产品用途、操作技能、选型方法、技术要求、试验方法、检验规则、应用方案等。

该书可供从事科研、设计、生产、测试、维修工作的电气工作者阅读, 也可作为各高等院校电气信息工程、测控技术、仪器仪表等专业的教学用书。

该书由中国电力出版社出版发行, 刊号 ISBN 978-7-5083-5078-3, 16 开本, 354 页。定价 40.00 元/册。

订购方法:

①中国电力出版社电工电子图书中心

地址: 北京三里河路 6 号

邮编: 100044

电话: 010-63416220

网址: <http://www.cepp.com.cn>

②上海安科瑞电气有限公司

(代邮, 免邮费, 请注明册数)

地址: 上海市嘉定区棕坊桥洪德路 99 号

邮编: 201801

电话: 021-59104851

传真: 021-59104852

联系人: 吕亚萍

网址: <http://www.acrel.cn>

