

# 考虑电压稳定约束的无功规划研究综述

刘群英<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 刘起方<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学水电学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 随着电力市场进程的加快, 系统运行不断逼近极限, 电压稳定已成为影响系统安全的焦点问题, 而合理的无功规划对保持系统电压稳定具有重要意义。首先解释了考虑电压稳定约束的无功规划基本概念, 接着对目前基于静态和动态电压稳定约束的无功规划模型和求解方法进行总结与评述, 提出了该领域需要深入研究的五个关键问题, 强调了考虑安全性和经济性的无功规划是当前该领域的发展趋势, 最后指出了建立基于动态电压稳定裕度的无功规划模型是避免系统电压崩溃的关键。

**关键词:** 电压稳定; 静态电压稳定约束; 动态电压稳定约束; 无功规划

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)17-0078-08

## 0 引言

国内外研究表明<sup>[1~5]</sup>, 威胁电网安全的最主要的问题之一就是电网无功补偿容量不足。在电力系统中, 系统负荷的增加、发电机或线路故障、系统无功不足、ULTC动作以及各控制和保护之间缺乏协调等都会影响系统电压稳定并可能进一步发展成为电压崩溃, 但是负荷缺少足够的无功(尤其是动态无功)支持是引起电压不稳定的主要因素。因此, 无功备用的规划必须以系统电压的稳定性为前提。

根据国内外相关文献<sup>[6~18]</sup>, 电力市场正式形成之前至初期, 无功规划问题的研究只考虑了系统经济性, 没有考虑系统的安全性, 规划结果不能保证系统具有充足的无功备用, 据此制定出来的无功电价也不能对系统的安全有任何保障。从市场竞争的角度考虑, 这种情形在小电网中不会出现严重的电压安全问题。但随着电力市场的发展和电网规模的扩大, 电力市场的竞争机制导致系统运行不断逼近极限, 电网运行在电压稳定裕度很低的工作点, 如果不及处理, 电网局部电压失稳将以滚雪球的方式影响整个电网, 从而导致整个电网电压失稳甚至崩溃。因此, 在市场环境下要保证系统的安全, 必须将电压稳定问题纳入无功定价体系, 以价格奖惩机制来合理配置无功备用, 达到控制和提高系统安全的目的。

随着电力市场发展的逐步成熟, 对考虑电压稳定约束的无功规划研究已经逐步展开。国内外研究表明, 当前对该课题的研究处于从静态电压稳定约束向动态电压稳定约束过渡的无功规划阶段, 因此

动态电压稳定约束下的无功规划研究, 无论从数学建模, 还是求解手段上, 都需要进一步研究。本文从阐述静态和动态电压稳定约束的无功规划的基本概念出发, 综述了其无功规划研究现状, 指出了该领域需要深入研究的几个关键问题。

## 1 考虑电压稳定约束的无功规划的基本概念

无功规划是保持电力系统无功平衡, 减少网损并保证电力系统安全运行的重要措施。无功规划不同于无功优化, 无功优化是在系统现有的无功补偿元件及调节设备范围内, 在满足系统各项约束条件下, 调节无功补偿设备和调节设备, 使目标函数得到最优解。而无功规划 RPP (Reactive Power Programming) 问题, 主要是对系统在较长一段时间内的无功需求进行估计以便投入足够的无功备用, 使系统能量损耗最小。优化是规划的必经阶段, 两者的结合, 即通过优化以后得到无功规划方案有利于节约投资成本。由于电力市场化以前的系统运行极少接近极限, 因此很少从系统安全性的角度进行无功规划。所建模型中, 只是常规地考虑满足电压水平约束。而电力市场环境下, 系统运行不断接近极限, 系统安全问题日益严重, 因此电压稳定成为无功规划必须考虑的前提条件。

电压稳定可分为静态电压稳定和动态电压稳定。根据相关文献<sup>[19~26]</sup>, 静态电压稳定研究的是平衡点的稳定情况, 关注的是电压水平; 而动态电压稳定, 一般研究系统电压的动态变化特性。由于这种变化特性是由系统元件(包括负荷)的动态特性所影响, 因此侧重于研究系统无功补偿元件(包括负

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2004CB217905)

荷)的动态特性对电压稳定的影响,这些影响可能是电压崩溃的诱因。而传统的电压稳定性是指电力系统受到扰动后,系统电压能够保持或者恢复到约束范围内的能力,其研究目标与静态电压稳定的研究目标一致。

并且,市场环境中的系统,还要受到经济因素的影响,而经济因素的涉入,有利于无功备用成本的节约。因此,市场环境下的无功规划大多同时考虑系统的安全性和经济因素。

基于上述定义,考虑电压稳定约束的无功规划 RPPCVSC (Reactive Power Programming Considering Voltage Stability Constraints) 分化为静态电压稳定约束下的无功规划和动态电压稳定约束下的无功规划。静态电压稳定约束下的无功规划是指在运行方式和网络拓扑结构固定并忽略控制设备的连续调节情况下,考虑电压水平在约束范围内并且网损最小和无功备用投入最少的无功规划;考虑动态电压稳定约束的无功规划,则是在系统运行方式或者网络结构变化情况下并允许控制设备的连续调节时,能够满足各母线电压水平在安全范围内并且网损最小和无功设备成本投入最小的无功规划。

RPPCVSC问题在数学上可以用一组目标函数和一组约束条件来描述,具有如下特点:多目标性;约束条件数量和类型众多;目标函数和约束条件的非线性;负荷及运行方式的不确定性;控制变量的离散性;存在响应速率不在同一数量级的状态变量和控制变量;目标函数难以用控制变量显式描述。该问题对算法有很高要求,并实际涉及两个目标函数:电压距离崩溃点最远;无功备用投入和网损费用最小。这两项能否最终结合在一个目标函数中、能否可靠、快速收敛到最优解、能否解决不可行问题还需要深入研究。

较之考虑电压稳定约束的无功规划,不考虑电压稳定约束的无功规划由于不涉及无功补偿元件的无功约束极限、分接头可调变压器的动作及负荷的动态特性研究,因此其目标函数较少受系统不确定性左右,约束条件的类型要简单得多,采用一般的优化算法可以得到最优解。

## 2 考虑静态电压稳定约束的无功规划模型及其算法

### 2.1 模型

电力系统考虑静态电压稳定约束的无功规划问题通常表示成含大量约束条件的非线性数学模型,

最初是考虑以有功、无功网损最小、无功备用投资最省作为目标函数<sup>[27,28]</sup>,其约束条件一般包括潮流方程等式约束和无功补偿容量、发电机无功出力、变压器抽头及电压幅值约束等不等式约束。随着研究的不断深入,在模型的建立上逐步复杂化,也开始有文献探讨不等式约束条件的获取办法。

文献[29]以有功网损最小、投资最省、系统负荷裕度最大和电压的最大偏差最小作为目标函数建立了多目标无功优化的数学模型;文献[30]采用整个电网中所有电能发电商的发电机有功、无功运行费用和整个输电网的传输费用作为目标函数;文献[31]提出无功规划期内系统总费用(包括新增无功补偿设备投资费用和运行费用)最小作为目标函数,采用等年值法作为比较判据,寻求总费用最小的方案;文献[32]以无功设备投资和系统有功网损的综合费用最小作为目标函数,特别探讨了静态电压稳定约束的确定办法,这样得到的无功规划方案距离实际应用又近了一步。

### 2.2 求解方法

常规无功优化问题的求解方法,主要有非线性规划法 NLP (Non - Linear Programming)、线性规划法 LP (Linear Programming) 以及人工智能搜索法等。由于求解的实质都归结为优化问题,因此对考虑静态电压稳定约束的无功规划问题的求解往往是常规方法的结合与发展。就目前而言,提出用于考虑长期静态电压稳定约束的无功规划的求解方法主要有:

#### 1) 内点法

内点法 (Interior Point) 在 1984 年得以提出,雏形是具有多项式时间可解性的线性规划内点算法,后来的 20 多年,各种内点法相继被提出,并已被扩展应用于求解二次规划和直接非线性规划模型。它们的主要优点是计算时间对问题的规模不敏感,计算速度快,收敛性好。

如文献[33]提出的一种原对偶法内点法内嵌函数的算法,可有效地求解连续变量和离散变量混合的无功优化问题,在计算速度、收敛性能和迭代精度上均较优;文献[34]针对无功优化计算中离散变量和连续变量共存问题,提出用直接非线性原-对偶内点法内嵌罚函数的新算法,通过对几个不同规模试验系统计算分析,并与 Tabu 搜索法求得的结果比较,在计算速度、收敛性和优化精度上都优于 Tabu 搜索法;文献[35]将内点线性和内点非线性规划算法应用于求解大型电力系统的无功优化问

题,并对两种算法的几个关键问题进行了研究,提出了有效的改进措施。这些改进使内点法在解决非线性混合整数规划无功优化的有效性和实用性方面更进了一步。

但是内点法在求解过程中同样存在缺陷,如在探测和处理优化过程中的不可行解的问题显得力不从心,如文献[36]所说,高阶修正方程的求解是制约内点线性化和内点非线性规划算法的计算瓶颈等。这些缺陷阻碍了内点法在实际工程中的应用。

### 2) 进化策略法

进化策略法(Evolutionary Strategy)于20世纪60年代提出,用于解决多参数优化问题。该方法从群体出发开始搜索,初始点群能使搜索越过函数的谷峰和谷底,找到最优点。并且,不需要导数或其他信息而利用目标函数的信息引导搜索方向,以及应用概率转移规则引导搜索而不是确定性原则是它的两大优势,再加上它的全局收敛性、固有的并行处理特性、通用性及鲁棒性强等优点,因此进化策略法在无功优化规划的求解时受到青睐。

如文献[37]针对无功优化规划较难获得全局最优解的问题提出了求解电力系统无功优化规划的进化策略方法,该方法通过对不同类型的变量采用不同的变异函数,使得进化策略方法可以解决组合优化问题,对优化问题无可导性要求,对初始点无特殊要求,获得全局最优解的概率大;文献[38]在对进化策略法进行深入研究的基础上,针对其在求解大规模无功优化问题时存在的计算过程长、难以满足约束条件的问题,提出将进化策略与系统电压无功调节的专家经验结合,对常规进化规划方法的随机变异操作进行了本质上的改善,具有计算速度快、搜索效率较高的优点。

### 3) 遗传算法

现代启发式搜索算法的发展,具有代表性的有蚁群算法、遗传算法、模拟退火法、Tabu搜索法和粒子群算法等。而遗传算法因其在最优问题求解时的突出优势被众人瞩目。当前对遗传算法的应用绝大多数是改进后或者与其它方法结合使用,主要是为提高计算速度,避免其求解过程的收敛早熟,易陷入局部极值的缺陷。

如文献[39]通过提高遗传参数、突变概率、交叉和解码技术,解决包括依靠静态电压的负荷模型的无功规划;文献[40]在基本遗传算法(SGA)的基础上,引入生物学中小生境的概念,制定了初始种群生成方法,以保证个体的多样性,从而形成可用于电

力系统无功优化的小生境遗传算法;文献[41]在克隆选择原理的基础上提出了一种改进的免疫算法用于求解电力系统无功优化问题;文献[42]采用遗传算法和ALOPEX算法相结合的方法求解无功优化;文献[43]提出了电力系统无功优化的遗传禁忌混合算法(GATS),针对电力系统无功优化中控制变量的离散性和连续性相混合的特点,提出了混合编码策略并相应地采用启发式算术进行杂交,使遗传算法(GA)和禁忌搜索算法(TS)的优点被保持,缺点被削弱。

## 3 考虑动态电压稳定约束的无功规划研究

一个具有实用价值的动态无功规划,必须考虑系统的不同运行方式以及方式之间的转移对系统各节点电压特性的影响、各运行方式下可能涉及的无功备用(包括负荷)的动态特性对系统各节点电压的影响、经济因素对规划方案的影响等,才能够适应系统和市场发展。因此,考虑动态电压稳定约束的无功规划的现有模型和算法面临严峻挑战。上节的静态电压稳定约束下无功规划的模型和求解方法研究总结为其提供了极具价值的借鉴,但由于考虑动态电压稳定约束的无功规划涉及大量控制元件和负荷的动态特性,并且这些模型中涉及到连续量和离散量的处理,甚至可能考虑元件快、慢动态响应特性,因此无论是数学模型还是在求解方法上,都比考虑静态电压稳定约束的无功规划复杂。

### 3.1 数学模型

虽然目前针对动态电压稳定提出了不少研究办法,但是从国内外的研究现状来看,将动态电压稳定与无功规划结合的研究还仅限于起步阶段,目前有少部分研究尝试在考虑动态电压稳定约束前提下进行无功规划。

如文献[43]采用的目标函数为以各时段所有发电机组对母线的有功传输的影响下的交易额的总和作为目标函数,其目标只是评估发电机无功出力多少对有功交易的影响,其约束条件为:潮流等式约束,有功交易约束、无功支持约束、发电机无功出力约束以及电压约束等。

文献[44]在文献[43]的基础上对目标函数进行变形,将无功对系统的影响分为支持有功输送和保持电压稳定两部分,包括考虑的发电机组无功出力多少对市场交易影响的目标函数和考虑动态无功对电压稳定裕度影响的目标函数,两目标函数以权重的方式结合,约束条件为潮流约束,有功交易约

束、无功支持约束、电压约束等。该模型考虑了经济性和安全性两种影响无功规划的因素,但是其目标函数形成的理论依据薄弱。

文献 [45] 以各时段的有功损失、发电机的无功出力成本、旁路电容的调节成本、变压器的分接头调节成本的总费用最小为目标函数,提出了一个新的多阶段优化模型。该模型从安全性和经济性出发,进行了涉及多种无功补偿装置的无功规划,比文献 [44] 更接近系统实际应用。其约束条件包括: a) 潮流等值约束; b) 母线电压安全约束; c) 发电机无功出力约束; d) 旁路电容容量约束; e) 变压器分接头范围约束; f) 旁路电容调节时间约束; g) 变压器分接头调节时间约束,约束 b)、c) 作为惩罚项加入目标函数。

以上无功规划模型都将电压稳定作为约束条件,而不是作为目标函数,并且大部分研究没有针对不等式约束给出具体的获取办法。所建立的模型大多基于单一运行方式并且在考虑影响电压稳定的系统元件的动态特性时显得不足。这样的模型不能完全适应系统的运行方式和网络结构的变化。无功市场的发展要求达到能够根据母线电压稳定裕度来进行无功定价的阶段,而考虑动态电压稳定裕度的无功规划研究将是必经之路。如果能够根据网络结构变化时负荷、发电机及其励磁控制系统、无功补偿器、ULTC 的调压作用以及 HVDC 的转换特性等会影响电压崩溃的元件动态特性来获取系统母线动态电压稳定裕度,在考虑该裕度的基础上进行系统无功规划,结果将有利于系统安全以及无功的定价分析。

### 3.2 求解方法

基于动态电压稳定约束的无功规划问题涉及的目标函数、约束条件复杂,且涉及不同时标、不同时域的控制变量,因此对求解方法有很高要求。总结目前的相关研究,遗传算法是应用比较频繁的一种求解方法。

如文献 [46] 综述了电力系统静态和动态无功优化的多种方法,经过分析比较得出了将遗传算法与其它算法结合能更理想地处理无功规划的结论。

文献 [43] 对模型的求解采用遗传算法,以个体交易额作为决策变量,采用灰色编码克服潜在的代表性的偏见,并引入一个与电压偏移的平方成比例的惩罚因子以确保潮流收敛,但是惩罚因子的确定办法没有给出。

文献 [47] 的模型采用免疫算法与遗传算法结

合求解,免疫算法的自我平衡机制和抗体的非一致性结构的优势在保留遗传算法本身优势的基础上提高了其全局和局部搜索速度,避免了收敛早熟。

## 4 考虑电压稳定约束的无功规划研究的关键问题

根据以上研究现状,在考虑电压稳定约束的无功规划的研究及其应用方面,必须解决如下几个关键问题:

1) 变量的处理问题。包括:对离散变量的处理问题,能否不采用连续化假设,直接处理离散控制变量;对不同时标的处理问题,如何将多时标化为同时标下方程的求解,以避免方程的病态解。

2) 求解质量问题,即选择何种优化算法可以获取真正最优解,并且在电网规划扩大的情况下算法的计算速度是否能适应实际需要。

3) 动态负荷的建模问题,即如何选取合理的动态负荷模型,以适应实际系统研究的需要。

4) 动态模型的统一问题,即能否将具有不同响应速度的无功补偿装置动态模型及负荷的动态模型合理综合在一个数学模型中,并且各元件的补偿容量对系统节点电压的影响能否显式表达。

5) 规划中多目标的协调问题,即能否将各节点电压的稳定裕度与系统母线无功备用充裕度的关系有机结合,同时考虑费用补偿问题,使经济性、安全性与规划方案三者形成互动关系。

国内外目前针对问题 (1) 中离散变量的处理作了大量研究,然而除进化策略法以及采用内嵌罚函数的内点算法能够解决离散问题以外,其他算法均将离散变量连续化,影响了优化解的精度。无功规划中对多时标问题的处理没有先例,本文认为采用控制理论中的奇异摄动法来解决该问题是一个明智的选择。关于问题 (2) 的求解质量上,正如文献 [27] 所述,内点法显示了对问题规模的不敏感,获得较满意的最优解,进化策略法则逊色不少。遗传算法较之前两者在求解精度和速度上均存在差距。问题 (3) 的相关研究多数针对恒态负荷模型,并且对负荷的不同响应特性的描述等同视之,这必然影响结果的准确性。由于负荷的动态特性是影响电压稳定的动态特性的最主要因素之一,因此建立精确的动态负荷模型对动态电压稳定性的研究是必要的。问题 (4)、(5) 实质是一个协调问题,因此采用目前人工智能领域的研究热点如 Multi-Agent 等与控制理论结合的办法有望解决该问题。

然而,目前的求解方法的实用性不足的现状与模型的复杂化要求之间的矛盾依然是制约研究进展的一大瓶颈。根据求解方法的需要将模型简化和近似处理,必定影响求解结果的精确性。本文认为,模型的精确化有益于问题分析的全面性和精确性,因此,局限于求解算法而牺牲模型的精确性的作法是不可取的,而从多领域寻找多种方法并结合使用,才是解决复杂模型的求解问题的有效办法。

## 5 结束语

电力系统电压稳定性问题是电力工程界的研究热点之一,而在电力市场环境将动态电压稳定问题与无功规划问题结合起来更是电力系统发展的必然趋势。当前的努力方向是如何尽可能把发电机无功出力、负荷的动态特性以及 ULTC 的调节作用与动态电压稳定裕度结合起来,以实现动态电压稳定裕度与无功关系的定量分析,从而在系统范围实现基于长期动态电压稳定裕度的无功规划。只有这样才能真正实现系统的动态无功补偿和动态无功定价,在考虑系统安全性的前提下刺激无功市场竞争。

## 参考文献:

- [1] MAO Jian-feng, ZHAO Qian-chuan, Christos G. Optimal Dynamic Voltage Scaling in Power Limited Systems with Real-Time Constraints[A]. 43rd IEEE Conference on Decision and Control 2004. 1472-1477.
- [2] 包黎昕,段献忠,何仰赞. 状态空间中电压稳定性的动态分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 17-22  
BAO Li-xin, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan. Dynamical Analysis of Voltage Stability in State Space[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 17-22.
- [3] Zobian A, Ilic M D. A Steady State Voltage Monitoring and Control Algorithm Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 929-938.
- [4] Zeng Y G, Berizzi A, Marannino P. Voltage Stability Analysis Considering Dynamic Load Model[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management 1997. 396-401.
- [5] 李欣然, 贺仁睦, 周文. 一种具有全电压范围适应性的综合负荷模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 71-75.  
LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHOU Wen. A Synthetic Load Model Suiting for Large Varying Range of Running Voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 71-75.
- [6] 张金奎, 林荫宇, 甘兴国, 等. 一种基于混和遗传算法的电力系统优化无功问题研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(1): 15-19.  
ZHANG Jin-kui, LIN Yin-yu, GAN Xing-guo, et al. The Study on Reactive Power Optimization of Power System Based on Hybrid Genetic Algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2000, 12(1): 15-19.
- [7] 张勇军, 任震, 钟红梅, 等. 基于灾变遗传算法的无功规划优化[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 29-32  
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, ZHONG Hong-mei, et al. Cataclysmic Genetic Algorithms Based Optimal Reactive Power Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 29-32.
- [8] 付瑾诚, 肖国泉, 舒隼. 基于线性规划的 Benders 分解法在无功规划中的应用[J]. 电网技术, 1998, 22(11): 30-33.  
FU Jin-cheng, XIAO Guo-quan, SHU Jun. Application of Benders Decomposition Based on Linear Programming in Reactive Power Planning[J]. Power System Technology, 1998, 22(11): 30-33.
- [9] Belhadj C A, Abido M A. Electric Power Engineering [A]. International Conference on Power Tech Budapest 1999.
- [10] 王主丁, 冯祈善. 电力系统无功规划优化实用方法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1984, 6(4): 23-30.  
WANG Zhu-ding, FENG Qi-shan. A Practical Optimization Algorithm for Reactive Power Planning in Power System[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1984, 6(4): 23-30.
- [11] Losi A, Rossi F, Russo M, et al. New Tool for Reactive Power Planning[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1993, 140(4): 256-262.
- [12] Lee K Y, BA I Xiao-m in, Park Y M. Optimization Method for Reactive Power Planning by Using a Modified Simple Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 43-50.
- [13] DONG Zhao-yang, Hill D J. Power System Reactive Scheduling within Electricity Markets[A]. International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management 2000. 70 - 75.
- [14] Iba K. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm [A]. Power Industry Computer Application Conference 1993. 195 - 201.
- [15] Yan Y H, Chung F C, Chen C S. Effect of Mutual Coupling to the Reactive Power Placement of Power Systems [A]. IEEE Region 10 International Conference 1992. 381-385.

- [16] Maheshwarapu S. New Static  $\beta$ -coefficients for Reactive Power Planning in Power Systems[A]. IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control 1998: 518 - 521.
- [17] Tychonievich L, Smith T C, Evans R. Influence Networks: a Reactive Planning Architecture [A]. Proceedings Seventh IEEE Conference on Artificial Intelligence Applications 1991: 354-360.
- [18] Mantovani J R S, Modesto S A G, Garcia A V. Var Planning Using Genetic Algorithm And Linear Programming [A]. IEEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 2001: 257-262.
- [19] 徐泰山,薛禹胜,韩桢祥. 关于电力系统电压稳定性分析方法的综述 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(5): 62-67.  
XU Tai-shan, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang A Survey on Voltage Stability Analysis Methods [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(5): 62-67.
- [20] 曹国云,赵亮,刘丽霞,等. 动态电压稳定模型中二维参数分岔边界的计算 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 24-27.  
CAO Guo-yun, ZHAO Liang, LU Li-xia, et al Calculation of 2-Dimensional Parameter Bifurcation Boundary in the Dynamic Voltage Stability Model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 24-27.
- [21] 刘道伟,谢小荣,穆钢. 基于同步相测量的电力系统在线电压稳定指标 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 13-17.  
LU Dao-wei, XIE Xiao-rong, MU Gang An On-Line Voltage Stability Index of Power System based on Synchronized Phasor Measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 13-17.
- [22] 彭志伟,胡国根. 研究电力系统电压动态稳定性的一种新方法(下)——实例分析 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(22): 40-44.  
PENG Zhi-wei, HU Guo-gen A New Method for Studying the Voltage Dynamic Stability of Power System by Using Bifurcation Theory (Part Two) - Case Study [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(22): 40-44.
- [23] Vu K T, Liu C C. Shrinking Stability Regions and Voltage Collapse in Power System [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1992, 39(4): 271-289.
- [24] Vu K T, Liu C C. Analysis of Dynamic Voltage Collapse Mechanism for a Three Bus Power System [J]. System & Control Letters, 1988, (11): 399-407.
- [25] 付英,钟德成. 自组织映射神经网络用于动态电压稳定分析的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 27-31.  
FU Ying, ZHONG De-cheng Hybrid Neural Network Approach to Dynamic Voltage Stability Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 27-31.
- [26] WANG Hai-feng, Li H, Chen H. Coordinated Secondary Voltage Control to Eliminate Voltage Violations in Power System Contingencies [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 588 - 595.
- [27] 丁勇,王秀丽. 考虑无功资源价值的无功实时定价 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1296-1300.  
DING Yong, WANG Xiu-li Real-Time Pricing of Reactive Power Based on Reactive Power Value [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(12): 1296-1300.
- [28] 李亚男,张粒子,杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1-4.  
LI Ya-nan, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han Reactive Power Optimization under Voltage Constraints Margin [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 1-4.
- [29] 胡彩娥,杨仁刚. 考虑电压稳定的电力系统无功优化规划 [J]. 继电器, 2005, 33(4): 22-25.  
HU Cai-e, YANG Ren-gang Optimal Planning for Reactive Power with Voltage Stability [J]. Relay, 2005, 33(4): 22-25.
- [30] 宋炯,赵岩,邵能灵,等. 电力市场下电压偏离的经济补偿问题 [J]. 华东电力, 2001, (12): 8-10.  
SONG Jiong, ZHAO Yan, TA INeng-ling, et al Financial Compensation of Voltage Deviation in Power Market [J]. East China Electric Power, 2001, (12): 8-10.
- [31] 韩敬东,董峰,鞠平. 电力系统无功优化规划的进化策略法 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 16-19.  
HAN Jing-dong, DONG Feng, JU Ping An Evolutionary Strategy Method for Reactive Power Planning of Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 16-19.
- [32] 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.  
LU 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.
- [33] 程莹,刘明波. 求解离散无功优化的非线性原-对偶内点算法 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 23-27.  
CHENG Ying, LU Ming-bo Nonlinear Primal-Dual Interior Point Algorithm for Discrete Reactive Power Optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 23-27.
- [34] 刘明波,程莹,林声宏. 求解无功优化的内点线性及内点非线性规划方法比较 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 22-26.

- LU Ming-bo, CHENG Ying, LING Sheng-hong Comparative Studies of Interior-Point Linear and Nonlinear Programming Algorithms for Reactive Power Optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 22-26
- [35] 张勇军,任震,李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56  
ZHANG Yong-jun, REN Zhen, LI Bang-feng Survey on Optimal Reactive Power Dispatch of Power Systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56
- [36] 韩敬东,董峰,鞠平. 电力系统无功优化规划的进化策略法[J]. 电力系统自动化, 2000, (17): 16-19.  
HAN Jing-dong, DONG Feng, JU Ping An Evolutionary Strategy Method for Reactive Power Planning of Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, (17): 16-19.
- [37] 颜伟,孙渝江,罗春雷,等. 基于专家经验的进化规划方法及其在无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 76-80.  
YAN Wei, SUN Yu-jiang, LUO Chun-lei, et al EP Basing on Specialist Experiences and Its Application to VAR Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 76-80.
- [38] Ma J T, Lai L L. Application of Genetic Algorithm to Optimal Reactive Power Dispatch including Voltage-dependent Load Models[A]. IEEE International Conference on Evolutionary Computation 1995.
- [39] 向铁元,周青山,李富鹏,等. 小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 48-51.  
XIANG Tie-yuan, ZHOU Qing-shan, LI Fu-peng, et al Research on Niche Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 48-51.
- [40] 郭创新,朱承治,赵波,等. 基于改进免疫算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 23-29.  
GUO Chuang-xin, ZHU Cheng-zhi, ZHAO Bo, et al Power System Reactive Power Optimization Based on an Improved Immune Algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 23-29.
- [41] 黄志刚,李林川,杨理,等. 电力市场环境下的无功优化模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 79-83.  
HUANG Zhi-gang, LI Lin-chuan, YANG Li, et al The Reactive Power Optimization Model Under Power Market and Its Solution [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 79-83.
- [42] 谭涛亮,张尧. 基于遗传禁忌混合算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 57-61.  
TAN Tao-liang, ZHANG Yao Reactive Power Optimization Based on Genetic/Tabu Search Hybrid Algorithm [J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 57-61.
- [43] Pirayesh A, Vakilian M, Feuillet R, et al Valuation of Dynamic Reactive Power Support Based on MW Transaction [A]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2004. 19-23.
- [44] Pirayesh A, Vakilian M, Feuillet R, et al A Conceptual Structure for Value Based Pricing of Dynamic Reactive Power Support [A]. Conference and Exhibition on Transmission and Distribution Asia and Pacific: 2005. 15-18.
- [45] SHU Jun, ZHANG Li-zi, LU Yi, et al An Improved Genetic Algorithm for Dynamic Reactive Optimization in Electrical Market [A]. International Conference on Power System Technology 2004. 1508-1512.
- [46] Pirayesh A, Vakilian M, Feuillet R, et al Valuation of Dynamic Reactive Power Support Based on MW Transaction Implementation Considerations [A]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering 2004. 19-23.
- [47] SHU Jun, ZHANG Li-zi, LU Yi, et al An Improved Genetic Algorithm for Dynamic Reactive Optimization in Electrical Market [A]. International Conference on Power System Technology, 2004. 1508-1512.

收稿日期: 2006-01-18; 修回日期: 2006-02-20

作者简介:

刘群英(1977-),女,博士研究生,研究方向为电力市场无功优化规划; E-mail: lqy1206@126.com

刘俊勇(1963-),男,博士生导师,教授,研究方向为无功优化,电力市场,灵活交流输电等。

### Survey on reactive power planning research considering voltage stability limit

LU Qun-ying<sup>1</sup>, LU Jun-yong<sup>1</sup>, LU Qi-fang<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** With the development of electricity market, system operation constantly approaches operation limits, so voltage stability

problem largely impacts on the security of system, while reasonable reactive power planning plays an important role in keeping voltage stability. In this paper, basic conceptions about reactive power planning considering voltage stability is first explained, and then models and algorithms on reactive power planning based on static and dynamic voltage stability limits are summed and commented and several important problems needing to research in depth are put forward in the end. On this basis, developing direction of reactive power planning is emphasized to consider security and economy. Also, it is proposed that reactive power planning modeling based on dynamic voltage stability margin is the key to avoid voltage collapse.

**Key words:** voltage stability; static voltage stability limits; dynamic voltage stability limits; reactive power planning

(上接第 62 页 continued from page 62)

收稿日期: 2006-05-10; 修回日期: 2006-07-01

作者简介:

雷 霞 (1973 - ),女,博士研究生,讲师,主要从事电力

市场和电力系统自动化的研究; E-mail: Snow\_Lei246@sina.com

刘俊勇 (1963 - ),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场、电能质量、分布式发电等的研究工作。

### Classified retail pricing model considering benefits of suppliers and customers

LEI Xia<sup>1,2</sup>, LU Jun-yong<sup>1</sup>, DANG Xiao-qiang<sup>1</sup>, DU Liang<sup>1</sup>, ZHAN Hong-xia<sup>2</sup>

(1. School of Electricity and Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Electrical Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** During the long time of the development of power market, distribution utilities are regulated by government. Because distribution utilities are both operators and governors, they should take consumers' benefits into account as governors in making retail prices, while considering their own benefits as operators. Consumers' benefits are hardly considered in pricing at present. This paper proposes a classified pricing method according to current consumer types. A model for making retail prices is set up, which includes benefits of distribution utilities and consumers. Load is viewed as a body responding to price fluctuation. The consumers' demand is considered in the model. At last, simulation analyzes how each element to influence retail prices, and shows rationality of the proposed method.

This project is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004B217905) and Youth Fund of Xihua University (No. Q0520902).

**Key words:** retail prices; benefits; power market; multi-goal decision; price elasticity of electrical demand

### 许继集团跻身 2006年度中国制造业 500强

2006年 8月 19日上午,2006年度中国制造业 500强暨大型工业企业信息发布年会在人民大会堂召开。会上,国家统计局公布了中国制造业 500强和 2006年度中国大型企业信息。许继集团以 512926万元的主营业务收入(不含税)位居 2006年度中国制造业 500强第 349名,在 2006年度中国大型工业企业中排名第 436位。

伴随中国经济的快速发展,一大批代表中国制造业发展水平的企业日益成长壮大,在世界上的影响力、竞争力与日俱增。为展现、宣传大企业在制造业发展中的地位、作用与贡献,引导企业不断做大做强、走集约化发展道路,国家统计局依据 2005年企业年报,按主营业务收入大小排序,首次向社会发布 2006年度中国制造业 500强;同时,按主营业务收入、资产总额和从业人员数三项指标划定了 2006年度中国大型工业企业共 2387家,一并向社会公布,希望对所有企业的健康发展起到积极的导向和示范作用。据了解,2006年中国制造业 500强企业的入选门槛已达 37.3亿元,河南省有 19家企业入选 2006年中国制造业 500强。