

应对多场景运行的柔性无功规划研究

程飞¹, 刘俊勇¹, 刘莹¹, 朱觅¹, 段登伟²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 成都电业局, 四川 成都 610065)

摘要: 将无功规划中所涉及的不确定性因素场景化, 通过场景化处理, 用多个场景状态来表示系统发展的动态过程。针对传统无功规划方案缺乏灵活性的不足, 提出了多场景柔性无功规划思想, 其将目标函数拆分为初始投资和波动费用两部分, 通过规划前期增加少量的无功投资, 使规划方案更具有灵活性, 更能适应未来环境的变化。并提出了基于轮次优化技术的多场景处理方法, 以 IEEE14 节点和某地区 1206 节点两个试验系统的算例结果表明该方法的有效性及其实用性。

关键词: 多场景; 无功分区; 柔性无功规划; 轮次优化

A study of flexible reactive power planning to cope with system multi-scenario operations

CHENG Fei¹, LIU Jun-yong¹, LIU Ying¹, ZHU Mi¹, DUAN Deng-wei²

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

2. Chengdu Electric Power Bureau, Chengdu 610065, China)

Abstract: Reactive power planning involves numerous of uncertainty, and these uncertainties are scenarioed in this paper. Through this treatment, numbers of scences is used to show the dynamic process of system development. On account of the traditional reactive power planning is lack of flexibility, an idea of flexible reactive power planning based on multi-scenario is proposed. It divides the objective function into initial investment and fluctuation investment. With a slight increase in the early planning of reactive power investment, it makes the planning more flexible to adapt to the future environment changes. Also, a multi-step optimal method which is used to deal with multi-scenario is proposed. The effectiveness and practicality of the proposed method are validated by the result of both IEEE 14-bus system and a certain actual distribution network with 1206-bus.

Key words: multi-scenario; reactive power division; flexible reactive power planning; multi-step optimal

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0043-07

0 引言

电网的无功平衡是保证电压稳定的基本条件, 由于电力系统中无功功率的发、供、用呈现分散性, 同时为避免远距离传输无功功率, 无功必须在分层、分区、分散合理平衡的基础上, 才能实现各节点电压保持在一个安全水平上^[1-2]。在负荷中心远离发电厂的受端电网中, 缺乏足够的无功支持, 若系统发生扰动, 可能会发生电压崩溃, 导致系统发生灾难性事故。无功备用不足及位置分布问题应在无功规划阶段解决。无功规划主要包括两个方面: 投资规划和运行规划^[3]。投资规划主要是确定无功补偿点和各节点的无功补偿容量及无功补偿装置的类型。运行规划则是在投资规划的基础上确定各无功源的发出功率以及各变压器分接头的位置以保证系统安全、稳定、经济运行。

传统的无功规划完全靠规划人员的经验, 所确定的补偿节点不一定是符合实际需要的补偿节点。对此文献[4]提出了先导节点的概念, 给出了考虑随机负荷且易于实现的前导节点选择算法, 并运用到无功源最佳配置节点的选择中去。文献[5]在潮流分析的基础上运用功率圆的相对位置确定了无功补偿节点及补偿容量。无功规划问题是寻求未来几年内新无功源经济补偿方案, 这类问题可转化为有约束规划问题, 目前的很多方法^[6]只考虑了系统的一种运行状态, 未考虑未来系统的不确定性因素的增加而使系统运行状态改变对无功规划的影响。因此, 当未来实际运行环境与预想环境发生很大差异的时候, 系统往往需要追加更多的无功投资才能保证系统的安全稳定运行, 从而使得目前规划缺乏灵活性和可行性。为此本文提出了一种基于多场景和无功分区技术的柔性补偿方法, 并通过 IEEE14 节点及

某地区 1206 节点系统算例,验证了这种方法兼顾了电力系统的经济性和安全性,在实际的电力系统中有可行性。

1 多场景技术及无功配置原则

在实际系统中,如何处理未来环境中出现的各种不确定性因素是规划的关键,这些不确定性因素包括网络拓扑、负荷特性以及电源出力等。因此,我们可以将各种不确定信息组合为一个未来可能的环境,称之为场景。每一个场景则对应了系统运行的一种状态,这样就突破了传统的完整网络拓扑下只考虑最大、最小和一般负荷运行方式的无功规划方法。通过对未来不确定性因素的处理组合,可形成多个场景,这些场景则形成了一个大的未来环境集合。多场景方法则是在未来的环境集合中寻找一个规划方案使之能够适应该集合中绝大多数场景子集^[7-9]。

为避免输电线路远距离传输无功,无功补偿则需要实现分层分区平衡。针对电压/无功运行与控制的区域性基本特征,本文将电气分区与灵敏度分析相结合,并在多场景环境下在无功不足的分区分中根据 Pareto 原则选择无功/电压灵敏度大的节点作为无功补偿候选节点^[10-12]。在计及多场景无功规划的过程中,不仅要考虑容性无功补偿的投入,对电压越限点也要考虑感性无功的增加。感性无功容量确定的原则是:在故障态或者最小负荷情况时,首先通过计算系统的潮流,如果有电压越限点,那么先通过调节与之相连的有载调压变压器分接头位置,如果调至极限仍不满足其电压要求则保持分接头位置不变,适当增加其感性功率。容性无功容量确定原则是:在不同的运行状态下计算出最小容性无功作为固定电容器安装容量,以所需最大容性无功功率和最小容性无功功率的差值作为可变电容器的安装容量^[13-18]。

2 柔性无功规划

2.1 定义

柔性无功规划是指在进行电网无功规划时,计及各种不确定性因素对规划的影响,以最佳的柔性规划方案来适应未来环境的变化,从而使规划方案在总体上达到最优^[19-25]。其柔性体现在能以现在的规划方案来适应未来环境的可能变化,使系统在未来的发展中以最小的代价弥补因可能出现的环境变化而造成的无功缺失。

2.2 描述

为描述柔性无功规划概念,在此假设两个无功

规划方案 X1 和 X2, X1 是由传统无功规划方法得到,在原预想未来环境下的最优方案;用可能环境来表示由于不确定性因素影响可能变化的环境,如图 1 所示, y1 和 y2 分别表示当未来环境的不确定性因素的影响下与原预想环境发生变化后,方案 X1 和 X2 为适应这种变化所追加的补偿投资,称为波动费用。由图示可以看出,尽管方案 X1 在原预想环境下的投资费用比方案 X2 少,但是当未来环境变化时该方案却要比方案 X2 追加更多的投资费用。因此,柔性无功规划的意义就在于通过在规划前期增加少量的资金投入,从而使系统更能适应未来环境的可能变化,在总体上节约了大量的资金投入和物资消耗。

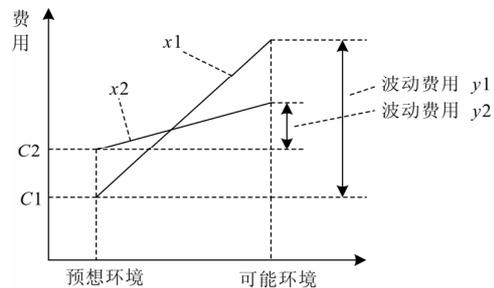


图 1 柔性无功规划概念示意图

Fig.1 Diagram of flexible reactive power planning

在柔性无功规划方案中,投资成本由两部分构成:初始投资 C 和波动费用 y。本文运用多场景技术采用组合的方法合理地设想多种可能的未来场景环境,以最佳的柔性规划方案来适应未来环境的变化,从而使规划方案在总体上达到最优。

3 数学模型

3.1 目标函数及约束条件

无功规划过程中,无功投资费用可表示为:

$$F = K_{Ci} \sum_{i=1}^{n_c} Q_{Ci} + K_{Li} \sum_{i=1}^{n_l} Q_{Li} \quad (1)$$

由以上对多场景情况下柔性无功规划方法的阐述可以得出本文的目标函数为:

$$\min F = f(Q_{Ci}, Q_{Li}) + \Delta f_k(Q_{Ci}, Q_{Li}) \quad (2)$$

等式约束条件:

$$\Delta P_i^k = P_{Gi}^k - P_{Di}^k - U_i^k \sum_{j \in i} U_j^k (G_{ij} \cos \theta_{ij}^k + B_{ij} \sin \theta_{ij}^k) = 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q_i^k = Q_{Gi}^k - Q_{Di}^k + Q_{Ci}^k - Q_{Li}^k - U_i^k \sum_{j \in i} U_j^k (G_{ij} \sin \theta_{ij}^k - B_{ij} \cos \theta_{ij}^k) = 0 \quad (4)$$

不等式约束条件:

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (5)$$

$$Q_{Cj}^{\min} \leq Q_{Cj} \leq Q_{Cj}^{\max} \quad (6)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G \leq Q_G^{\max} \quad (7)$$

$$Q_{Lj}^{\min} \leq Q_{Lj} \leq Q_{Lj}^{\max} \quad (8)$$

$$t_k^{\min} \leq t_k \leq t_k^{\max} \quad (9)$$

式中: F 为系统的投资规划费用; f 为系统的初始投资费用; Δf_k 为 k 场景下的波动费用; K_{C_i} 、 K_{L_i} 分别为节点 i 的单位电容器和单位电抗器的投资系数; Q_{C_i} 、 Q_{L_i} 分别为节点 i 的电容器和电抗器的补偿容量; n_c 、 n_l 分别为电容器与电抗器的补偿节点数; k 为系统的规划场景数; U_i^{\min} 、 U_i^{\max} 为节点电压的上下限; t_k^{\min} 、 t_k^{\max} 为可调变压器变比的上下限; Q_G^{\min} 、 Q_G^{\max} 为动态无功电源出力的上下限; P_{G_i} 为节点 i 的注入有功功率; Q_{G_i} 为节点 i 的注入无功功率; $P_{D_i}^k$ 、 $Q_{D_i}^k$ 为第 k 个场景下节点 i 的负荷有功功率和无功功率; $Q_{C_i}^k$ 、 $Q_{L_i}^k$ 为第 k 个场景下节点 i 的电容器和电抗器的无功出力

3.2 无功补偿点及补偿容量的确定

无功规划主要解决的是确定无功源的选址定容问题。本文将无功分区技术和灵敏度分析相结合, 根据 pareto 法则确定无功补偿布点。

稳态情况下, 电力系统中功率、电压之间的关系线性化方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 为节点的有功、无功增量; $\Delta \theta$ 、 ΔV 为节点的相角和电压幅值增量; 雅克比矩阵中的各元素则给出了功率与电压之间的灵敏度。由式 (10) 可知, 系统在满足各节点电压安全性的情况下, 节点的无功补偿容量为:

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (11)$$

$$J_R = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \quad (12)$$

其中: J_R 反映了节点电压与节点注入无功功率之间的关系。

4 多场景优化处理方法

在进行多场景优化前, 首先通过线性规划法确定单场景状态下系统所需的无功补偿方案, 然后对其进行多场景轮次优化。

本文将多场景轮次优化分为五个阶段, 每个阶

段都包含了一系列的单场景优化:

阶段 1: 按照单场景下系统所需无功补偿将多场景排序。这种排序决定了后两个阶段的优化次序, 本文按照无功补偿容量大小进行降序排序。

阶段 2: 按照阶段 1 中所进行的场景排序进行单场景下的无功优化。对于任一种单场景优化, 一旦确定了无功补偿, 则可视为已存在的无功源, 并参与以后的场景优化。此阶段末, 在满足系统电压和无功约束条件下每个场景状态都会得到足够的无功支持。由于单场景规划后系统新增了无功电源, 原有的无功约束容量增加, 但容量上的增加并没有改变系统的不等式约束条件形式, 因为就所有的系统状态而言无功源输出极限并没有忽略, 然而此阶段无功源的配置并不一定是最优的, 因为可能安装冗余过多的无功补偿容量。因此阶段 3 对此阶段进行优化。

阶段 3: 本阶段主要是通过一系列的回代计算来提高阶段 2 的精度, 在阶段 2 的基础上删除某些节点冗余的无功容量, 以达到整个系统无功补偿成本最小。

阶段 4: 若单个系统优化成功, 则在结果文件中给出每个节点的新无功安装容量, 否则, 程序重复阶段 2 和阶段 3。对一个系统而言, 先用潮流程序计算出系统的一个合理的初值是最重要的。

阶段 5: 进行安全性校验。

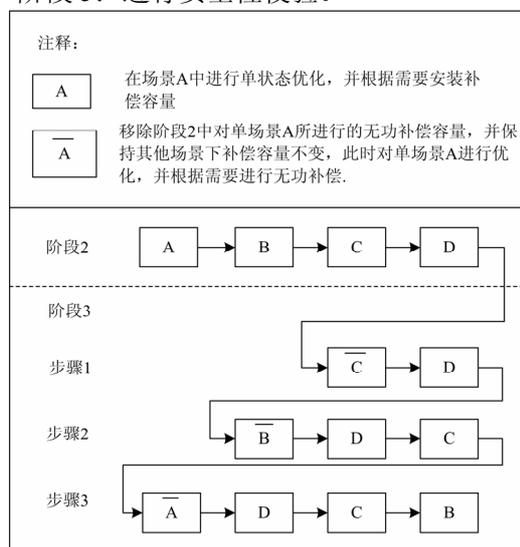


图 2 多场景处理方法

Fig.2 Multi-scenario processing method

图 2 中 A、B、C、D 四种场景展示了阶段 2 和阶段 3 中多场景下无功排序及其处理方法。阶段 3 包含的最大步骤数为 $N_s - 1$, 单场景优化数为 $0.5N_s(N_s + 1) - 1$, N_s 表示场景数。表面上看系统

的运行时间会随着系统场景数的增长成平方关系。实际上系统的运行时间并没有增长的那么快，主要原因有以下两点：(1) 阶段 3 中并不是所有的步骤都需处理，如果步骤一开始并不需要无功冗余处理时，这些步骤将被忽略。(2) 程序采用的是热启动模式，即同一个系统中前一个场景优化结果作为下一个场景优化的起点，这样就避免了重复计算，减少了机时。

5 算例分析

本文模型基于多场景技术，通过上述阶段 1 的单场景处理，并运用多场景排序处理方法使得此方法具有良好的收敛性。本文以 IEEE14 节点标准数据和某地区 1 206 节点模型数据为例来说明本文方法的有效性。基本数据如表 1 所示，为验证此种方法对各电压等级的适用性，对两个算例基准电压分别取 220 kV 和 500 kV，补偿器分别选取集合式电容器和 LKGKL 型干式空心滤波电抗器。其中式(1)中投资系数 K_{Ci} 、 K_{Li} 分别取值为 4.8 万元/Mvar 和 12 万元/Mvar。

表 1 试验系统基本数据

Tab.1 Basic data of test system

系统名称	IEEE14	1206 节点系统
节点数	14	1 206
支路数	21	2 242
SVC 节点数	0	25
发电机数	2	214
场景数	5	15

5.1 IEEE14 节点系统算例

图 3 给出了 IEEE14 节点系统接线图。其中 1、2、3、6、8 节点为 PV 节点，其他各节点电压约束为 0.95~1.05。

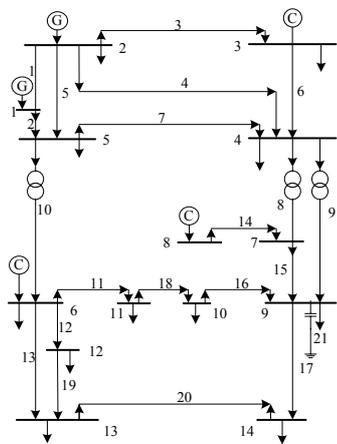


图 3 IEEE14 节点系统接线图

Fig.3 Connection diagram of IEEE 14-bus system

5.1.1 传统无功规划方案制定

传统无功规划方法是以系统最大运行方式下，寻找系统电压薄弱节点然后以此为补偿节点，确定规划年内的无功补偿容量。

本文以系统有功负荷和无功负荷最大为系统运行方式，取 IEEE 数据的 110%为基础数据，在模态分析中采用区域增长模式，增长补偿为基础数据的 10%，模态分析结果如表 2 所示。

表 2 模态分析结果

Tab.2 Result of model analysis

特征值: 0.363 948	
节点	参与因子
14	1.000 00
13	0.868 80
12	0.868 03
10	0.820 52
11	0.819 35
9	0.732 20
6	0.671 69
7	0.537 95
8	0.516 97
4	0.198 24
5	0.167 47
3	0.133 35

由模态分析结果可以看出节点 9、10、11、12、13、14 这 6 个节点的参与因子比较大，可选此 6 个节点为无功补偿候选节点，通过仿真分析得到无功规划方案如表 4 所示。

5.1.2 多场景无功规划方案制定

系统基础数据为 IEEE 标准数据的 105%，表 3 给出了系统的 5 种场景。通过多场景柔性规划方法对系统进行无功规划仿真，得到规划结果如表 4 所示，电容和电抗分别用+、-表示。

表 3 系统场景描述

Tab.3 Description of system scenes

场景数	场景描述
1	系统拓扑完整，无故障
2	线路 5 故障
3	节点 9 并联电容器故障退出 母线 9 新增并联电容器，并联电纳为 0.000 23
4	线路 7 故障
5	节点 8 和节点 14 之间增加线路 22

表 4 无功规划方案对比

Tab.4 Comparison of reactive power planning scheme			
传统方案		多场景柔性方案	
补偿节点	补偿容量/Mvar	补偿节点	补偿容量/Mvar
14	-9.58	1	5.32
13	-2.52	3	4.25
12	4.44	9	-5.58
10	1.85	10	7.98
11	-5.43	11	-3.14
9	12.79	12	5.04
		14	-8.43
总补偿容量	36.61		39.74

传统规划方法确定无功规划方案后, 系统总的有功和无功损耗为 10.457 6 MW 和 38.546 2 Mvar, 多场景柔性规划方法下系统总的有功和无功损耗为 8.265 4 MW 和 29.352 4 Mvar。由此可以看出多场景柔性方法更能优化系统潮流。

5.1.3 同一预想场景下, 传统方法和多场景柔性规划方法对比

以多场景方案规划中场景 2 (线路 5 开断) 为验证条件, 此时选取系统运行状态为平均负荷状态, 即 IEEE 标准数据, 此时, 系统各节点电压水平如图 4 所示。

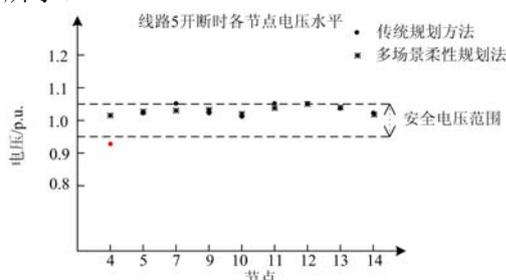


图 4 预想场景下节点电压水平

Fig.4 Nodal voltage level in pre-scenario

由此可以看出, 传统规划方案中节点 4 电压低于电压约束值, 此时系统各支路的有功和无功损耗如图 5。传统规划方法中, 系统总的有功和无功损耗为 11.793 6 MW 和 44.471 5 Mvar, 而多场景方法则是 7.584 1 MW 和 32.120 2 Mvar。

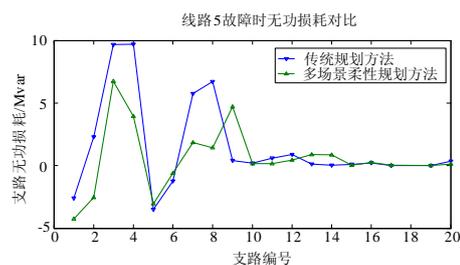
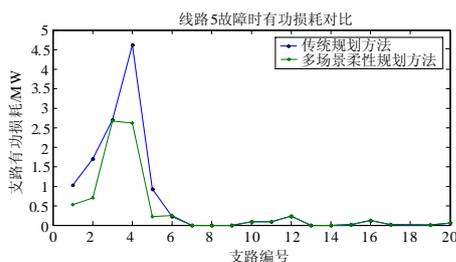


图 5 有功损耗和无功损耗对比

Fig.5 Comparison of real and reactive power loss

5.1.4 当未来运行环境不在预想环境内时

当系统未来环境不在预想场景范围内时, 即未来运行状态中, 预想场景 3 中线路 18 故障, 节点 10 负荷比预测负荷增加 10%。此时观察两种规划方案下, 系统的运行水平和潮流状态如图 6, 图 7 所示。

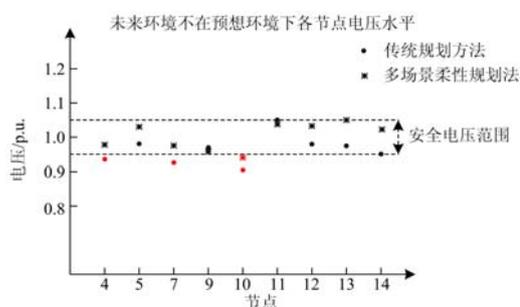


图 6 预想场景改变时节点电压水平

Fig.6 Nodal voltage level when pre-scenario changes

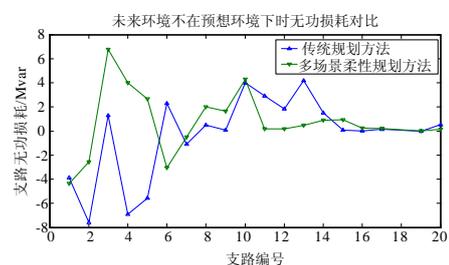
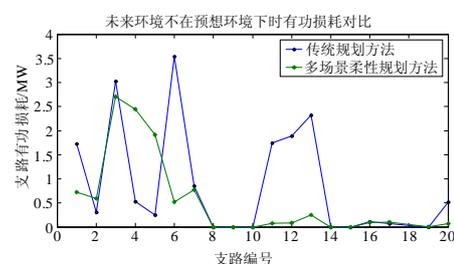


图 7 有功损耗和无功损耗对比

Fig.7 Comparison of real and reactive power loss

由图示分析可以看出, 传统规划方法下系统有 3 个节点的电压越限, 而多场景柔性规划方法则只有 1 个节点。由潮流分析可以看出, 多场景方法比传统方法有功和无功损耗分别减少 6.541 3 MW 和

9.316 7 Mvar, 由此可以看出, 当系统未来环境发生变化时, 多场景方法覆盖的安全范围则更广, 系统损耗则更小。

此时, 为了保证系统各节点电压都保持在安全水平, 应对系统进行无功补偿, 在此我们称之为波动投资 y 。表 5 给出了系统此时总的投资组成。

表 5 投资方案对比

传统方法/万元		多场景方法/万元	
C1	y1	C2	y2
301.944	52.128	314.232	28.342

由此可以看出, 多场景方法只需要追加少量的无功投资即可以达到系统安全要求, 从整个过程来看, 传统方法要比多场景柔性规划方法投资大, 而覆盖的安全范围则相对小。因此多场景柔性无功规划方法更具有灵活性, 更能适应未来环境的变化。

5.2 1206 节点系统计算结果

为证明此方法的实用性, 采用某地区 1 206 节点系统做算例, 对此系统运用 15 个场景、23 个无功分区来处理。由于系统节点数目大, 每个场景所包含的故障数多, 因此, 此算例就不对场景描述和无功分区做过多的赘述。

表 6 多场景无功规划方案

Tab.6 Scheme of multi-scenario reactive power planning

补偿节点	所属区域	补偿容量/Mvar
NINF11	12	131.13
ABHA12	14	50.60
BOLN12	12	39.14
ABHA11	14	38.38
AXMI10	13	31.21
NURS40	12	23.64
NURS10	12	20.96
ECLA4M	07B	19.35
LAND10	14	18.45
TAUN10	13	16.91
FLEE12	12	-16.30
LAND40	14	13.29
NINF12	12	11.68
ALVE4B	14	8.32
BOLN11	12	7.20
WALP11	07A	-4.90
WIMB12	11	-4.34
ELST21 (SVC)	10	-2.75
ELST22 (SVC)	10	-2.11
总补偿容量		460.66

表 6 给出了 1 206 节点系统在 15 种场景状态下的无功规划方案, 由方案可知: 系统比较严重的薄弱区域主要集中在 10、11、12、13、14 五个区域, 主要是因为这些区域处于系统的受端, 缺乏足够的无功支持, 存在电压安全风险。根据方案, 此时系统的初始总投资为 2 430.048 万元。当系统未来场景发生变化时, 即当区域 07A、SCOTLA、02A 负荷比预想负荷增长 5% 时, 两种方法节点电压超限个数及有功损耗和无功损耗对比如表 7 所示。

表 7 系统数据对比

	传统规划	多场景柔性规划
节点电压超限个数	78	49
有功损耗/MW	1 165.7	1 041.6
无功损耗/Mvar	30 954.564	30 065.153

此时, 为了保证各节点电压的安全性, 柔性规划方案需要增加的波动投资为 51.744 万元。此时波动投资方案如表 8 所示。

表 8 波动投资方案

Tab.8 Fluctuation investment scheme

补偿节点	所属区域	补偿容量 / Mvar	波动投资 / 万元
SIZE81	07A	6.52	31.296
LAND40	14	2.21	10.608
ECLA40	07B	2.05	9.84
总波动投资: 51.744 万元			

由此算例可以看出, 此方法可适用于节点数目大的实际系统中, 并且此方法的收敛性好。当系统预想环境发生较大的变化时, 此种方法则更能够保证系统的电压安全性。

6 结论

(1) 本文规划方案以场景分析为基础, 避免了各因素之间的关联困难, 可较为准确地体现将来的不确定性。

(2) 在单场景优化的求解上不需要任何其他特别的设计, 可直接利用确定性优化算法求解。

(3) 在多场景处理上, 本文采用轮次优化技术, 首先将单场景排序, 然后根据排序结果优化各场景所需无功补偿, 确定多场景状态下的无功规划方案。

(4) 本文最终所得结果并不是针对某一特定场景的最优, 而是综合所有场景发生的总体方案最优, 体现了对将来不确定性的良好适应性。

(5) 随着现代电力系统向市场化、智能化方向发展, 在未来的电力系统无功规划的过程中应考虑

系统的智能预警建设,从而给调度员以预警信息,使系统从不稳定或者弱稳定状态恢复到稳定状态。

参考文献

- [1] Taylor C W. 电力系统电压稳定[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power System Voltage Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [3] 胡彩娥. 考虑静态电压稳定裕度的多目标电压-无功规划[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
HU Cai-e. Multi-objective Voltage-VAR Planning with Static Voltage Stability Margin[D]. Beijing: China Agriculture University, 2004.
- [4] 姚小寅, 孙元章, 王志芳. 电力系统无功源最佳配置地点的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 12-15.
YAO Xiao-yin, SUN Yuan-zhang, WANG Zhi-fang. Studies on the Optimal Allocation of Reactive Power Source[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 12-15.
- [5] 刘传铨, 张焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 78-81.
LIU Chuan-quan, ZHANG Yan. Confirmation of Reactive Power Compensation Node and Its Optimal Compensation Capacity [J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 78-81.
- [6] 高赐威, 程浩忠, 王旭. 考虑场景发生概率的柔性约束电网规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 34-38.
GAO Ci-wei, CHENG Hao-zhong, WANG Xu. Electric Power Network Flexible Planning Model Based on the Probability of Scene Occurrence[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 34-38.
- [7] 郑智, 周双喜, 徐飞, 等. 基于多场景和模糊技术的综合无功规划[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 41-45.
ZHENG Zhi, ZHOU Shuang-xi, XU Fei, et al. Comprehensive Reactive Power Planning Based on Multi-scenario and Fuzzy Technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 41-45.
- [8] 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.
- [9] 程浩忠. 电力系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.160, 173-174.
CHENG Hao-zhong. Power System Planning[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. 160, 173-174.
- [10] CHEN Yuan-lin. Weak Bus-Oriented Optimal Multi-objective VAR Planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1885-1890.
- [11] CHEN Yuan-lin. Weak Bus Oriented Reactive Power Planning for System Security[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 1996, 143(6): 541-545.
- [12] Krami N, El-Sharkawi M A, Akherra M. Pareto Multi-objective Optimization Technique for Reactive Power Planning[A]. in: Power and Energy Society General Meeting[C]. 2008.1-6.
- [13] 余建明, 杜刚, 姚李孝. 结合灵敏度分析的遗传算法应用于配电网无功补偿优化规划[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 46-49.
YU Jian-ming, DU Gang, YAO Li-xiao. Application of Genetic Algorithm Combining Sensitivity Analysis to Optimized Planning of Reactive Power Compensation for Distribution Networks[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 46-49.
- [14] 余建明, 张栋, 姚李孝. 基于一种新待补偿点定位法的配电网无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 67-70.
YU Jian-ming, ZHANG Dong, YAO Li-xiao. Reactive Power Optimization of Distribution Network based on a New Location Algorithm Nodes to be Compensated[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 67-70.
- [15] Thorp J D, Dunnett R M, Dixon A M. Minimizing Reactive Compensation on the Electricity Transmission System[J]. Annals of Operations Research, 1993, 43: 467-476.
- [16] ZHANG Wen-juan, LI Fang-xing, Tolbert L M. Review of Reactive Power Planning: Objectives, Constraints, and Algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2177-2186.
- [17] Chattopadhyay D, Chakrabarti B B. Reactive Power Planning Incorporation Voltage Stability[J]. Electrical Power and Energy System, 2002, 24: 185-200.
- [18] Thomas W R, Dixon A M, Cheng D T Y. Optimal Reactive Planning with Security Constraints[A]. in: Power Industry Computer Application Conference[C]. 1995.79-84.
- [19] 金华征, 程浩忠. 电力市场下的电网灵活规划方法综述[J]. 电力系统自动化学报, 2006, 18(2): 10-17.
JIN Hua-zheng, CHENG Hao-zhong. Review of Transmission Network Flexible Planning in Market Environment[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18(2): 10-17.
- [20] 程浩忠, 范宏, 翟海保. 输电网柔性规划研究综述[J]. 电力系统自动化学报, 2007, 19(1): 21-27.
CHENG Hao-zhong, FAN Hong, ZHAI Hai-bao. Review of Transmission Network Flexible Planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2007, 19(1): 21-27.
- [21] 金华征, 程浩忠, 曾德君, 等. 基于集对分析的柔性电网规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 7-12.

(下转第 104 页 continued on page 104)

开发, 扩展性和可移植性强, 开发周期短, 并且随着 CPU 处理能力的不断提高以及软件技术的进步, 系统性能还有进一步提升的空间。

参考文献

[1] 周立岩, 孙毅, 冯小安. 提高电力负荷管理系统通信效率的新方法[J]. 电力系统通信, 2008, 28 (128): 46-49.
ZHOU Li-yan, SUN Yi, FENG Xiao-an. New Method of Improving Communication Efficiency in Power Load Management System[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 28 (128): 46-49.

[2] 无管字 5 号, 民用超短波遥测遥控数据传输业务频率划分[S].
Radio Administrative Bureau No.5 , Frequency Allocations of Civil Ultrashort Wave Telemetering and Telecontrol Data Transmit Servies[S].

[3] 曹瀚文, 王文博. GNU Radio: 开放的软件无线电平台 [J]. 电信快报, 2007(4): 31-34.
CAO Han-wen, WANG Wen-bo. GNU Radio: Open Source SDR Platform[J]. Telecommunication Information, 2007(4): 31-34.

[4] Blossom E. How to Write a Signal Processing Block[EB/OL]. <http://www.gnu.org/software/gnuradio/doc/howto-write-a-block.html>. 2006.

[5] 杨小牛, 楼才义, 徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 68-85.
YANG Xiao-niu, LOU Cai-yi, XU Jian-liang. Principles and Applications of Software Defined Radio[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.68-85.

[6] Ray Andraka. A Survey of CORDIC Algorithms for FPGA Based Computers[A]. in: Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA Sixth International Symposium on Field Programmable Gate Arrays[C]. 1998. 191-200.

[7] 徐以涛, 沈良, 王金龙. FPGA 技术在软件无线电中的应用[J]. 电信科学, 2001, 11: 36-39.
XU Yi-tao, SHEN Liang, WANG Jin-long. Application of FPGA Technology in Software Radio [J]. Telecommunications Science, 2001, 11: 36-39.

收稿日期: 2009-06-17; 修回日期: 2009-07-13

作者简介:

闫 龙 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统通信、无线通信; E-mail: yanlongchina@gmail.com

王智海 (1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事配电自动化运行管理工作;

祁 兵 (1965-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为电力系统通信、无线通信和多媒体通信。

(上接第 49 页 continued from page 49)

JIN Hua-zheng, CHENG Hao-zhong, ZENG De-jun. A Novel Method of Flexible Transmission Network Planning Based on Set Pair Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (3) : 7-12.

[22] 王佳贤, 程浩忠, 胡泽春. 多负荷水平下的配电网无功优化规划方法[J]. 电网技术, 2008, 32 (19): 56-61, 83,
WANG Jia-xian, CHENG Hao-zhong, HU Ze-chun. Optimal Reactive Power Planning for Distribution Systems Considering Multi-load Levels[J]. Power System Technology, 2008, 32 (19) : 56-61, 83.

[23] 刘群英, 刘俊勇, 刘启方. 考虑电压稳定约束的无功规划研究综述[J]. 继电器, 2006, 34 (17) : 78-85.
LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Survey on Reactive Power Planning Research Considering Voltage Stability Limit[J]. Relay, 2006, 34 (17) : 78-85.

[24] 李勇, 张勇军, 等. 基于N-1方式的无功优化规划[J]. 高电压技术, 2007, 33 (9) : 100-103, 133.

LI Yong, ZHANG Yong-jun, et al. Optimal Reactive Power Planning by N-1 Mode[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (9) : 100-103, 133.

[25] 李林川, 王建勇, 陈礼义, 等. 电力系统无功补偿优化规划[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (2) : 66-69.
LI Lin-chuan, WANG Jian-yong, CHEN Li-yi, et al. Optimal Reactive Power Planning[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (2) : 66-69.

收稿日期: 2009-09-14; 修回日期: 2009-10-11

作者简介:

程 飞 (1984-), 男, 硕士, 主要从事电力系统电压稳定性和无功规划方面的研究工作; E-mail: zzchengfei@yahoo.com.cn

刘俊勇 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力系统可视化及电力系统稳定与控制等方面的研究;

刘 莹 (1985-), 女, 硕士, 主要从事电力系统故障告警及稳定控制研究。