

基于无功能力考虑的配电系统可靠性评估

高 岩, 李华强, 林茂君

(四川大学电气信息学院智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要:提出了一种考虑电网区域无功能力的配电系统可靠性评估方法。通过建立区域电网无功能力的数学模型, 定义了无功能力的指标, 并考虑了电压稳定性、节点电压水平和热稳定等安全约束条件。进而计算出无功能力参数的不确定性对配电系统可靠性的影响。考虑到网络运行条件对无功能力的影响, 通过运用原始-对偶内点法计算确定网络运行时的状态。并在系统当前运行情况下模拟多种“N-1”故障, 进行了验证仿真, 最后在此条件下进行配电系统可靠性评估。算例中, 分析了无功能力参数不确定的条件下对配电系统可靠性评估的影响, 证明了此方法的有效性、可行性和实用性。

关键词:配电网可靠性; 无功能力; 无功裕度; “N-1”准则; 原始-对偶内点法

Abstract: A reliability evaluation method of distribution network considering the regional reactive power capability is proposed. By establishing the mathematical model of regional network reactive power capability, the index of reactive power capability is defined, and the security constraints of the voltage stability, node voltage level and the mostability etc. are considered. And then the influence of the uncertainty of the reactive power capability parameters on the reliability of distribution system is calculated. The influence of network operating conditions on reactive power capability is considered, and the condition of network operation is calculated and determined with primal-dual interior point method. In the current operating condition of the system, several "N-1" faults are simulated and verified. Finally, the reliability evaluation of distribution system is carried out in this condition. In the example, the influence on the reliability of distribution system under the uncertain reactive power capability parameters is analyzed, which proves its effectiveness, feasibility and practicality.

Key words: distribution network reliability; reactive capability; reactive margin; "N-1" principle; primal-dual interior point method

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)02-0048-04

随着当前经济的快速发展, 配电系统的规模日益庞大。而配电系统的可靠性对用户可靠性水平有着显著的影响。据不完全统计, 用户的停电事故中有 80% 是由配电系统的故障引起的^[1]。因此, 配电系统的可靠性问题也越来越受到人们的重视。

目前, 国内外对配电网可靠性评估算法的研究已日趋成熟^[2]。针对于配电网可靠性的评估的算法可分为两大类: 解析法和模拟法。常用的模拟法^[3, 4]是 Monte Carlo 方针方法, 对于实际大规模系统, 为了提高精度, 采用模拟法的计算时间将显著增加。解析法的主要优点是计算相对简单, 计算速度较快, 该方法又可分为: 状态空间法^[1]、网络等值法^[5]、最小割集法^[6]、故障模式后果分析法^[7]、故障遍历^[8]和容量约束^[9]等多种方法, 然而迄今为止, 在配电网可靠性评估的算法中从无功容量约束方面的考虑太少。由于在实际应用中常常需要考虑无功容量的约束, 如过负

荷或电压越界。所以, 有必要考虑无功容量约束的评估算法。

无功能力作为一个新近提出的作为电力网络安全运行的一个重要技术指标, 直接关系到电力系统的经济性、安全性和可靠性^[10]。国内外研究表明^[11-13]; 无功不足是导致系统电压失稳乃至崩溃的主要原因, 电压稳定性评估是电力系统中非常重要的任务, 无论是在正常运行条件下, 或是在事故后状态下, 系统都需要维持在一个合适的稳定裕度, 影响电网的电压稳定性的因素是由各个控制因素和网络运行因素共同组成的^[14, 15], 当对电网的电压水平以及电压稳定进行评估时, 无功能力很显然会对电压的稳定裕度产生巨大的影响^[16]。

基于此, 提出区域电网的无功能力评估问题, 即, 现有网络中的无功水平及其无功储备能否保证系统的电压水平、电压稳定及其线路热稳定等安全约束, 并在

事故后仍然保证上述约束条件不会被破坏。因此,这里提出了区域电网无功能力指标,建立了指标评价体系的数学模型,并进行了数值仿真。然后,在此基础上进行“N-1”状态下的配电系统可靠性评估。

1 无功能力指标数学模型的建立

1.1 电网无功能力指标

从电网的结构和运行特性可知,电网的各种无功电气元件由发电机、并联电抗(容)器、SVC、变压器、输电线路和复合组成,其中变压器、输电线路和负荷又是消耗无功的主要因素。伴随网络负荷的增长,在电网输送功率增加的同时,电网消耗的无功也会增加,从而导致系统功率因素降低,电压下降。为稳定电网的电压稳定,并保证向用户输送满足负荷质量要求的电能。因此,在电网负荷增长的过程中,电网的无功储备必须要满足下式安全约束。

$$Q_z > Q_r \quad (1)$$

其中, Q_z 为电网当前装备无功容量的最大值; Q_r 为电网在重负荷情况下,电网电压水平范围边界或接近电压崩溃点处为维持电压稳定和电压水平所需的无功容量值。

$$\text{式中, } Q_z = \sum Q_{gi} + \sum Q_{ci} \quad (2)$$

其中, $\sum Q_{gi}$ 为发电机,同步调相机最大无功出力; $\sum Q_{ci}$ 为本网并联电抗(容)器组, SVC 最大无功出力。

$$Q_r = \sum Q_{rgi} + \sum Q_{rci} \quad (3)$$

其中, $\sum Q_{rgi}$ 为可行电压水平范围边界或接近电压崩溃点处对发电机、同步调相机的无功需求;

$\sum Q_{rci}$ 为可行电压水平范围边界或接近电压崩溃点处对本网并联电抗(容)器组, SVC 最大出力需求。

n 为本网节点数

按照区域电网无功能力的定义,无功能力应该是电网中现有的无功元件能够提供的无功容量总和与电网中支持电压水平和电压稳定裕度的所有节点的无功需求容量总和的比值(η)。

$$\text{即 } \eta = Q_z / Q_r \quad (4)$$

1.2 区域电网无功能力指标的制约因素

区域电网的无功能力指标是一个技术特性尺度指标,可以用来衡量区域电网无功设备对由于负荷的增加维持电网电压水平和电压稳定的能力。在实际求解时要考虑许多因素的影响,如系统的运行状态、电网结构及符合需求增长等。除此之外,它的计算还会受到许多约束的制约,如电压幅值限制和电压稳定

限制等,并且这些安全约束在 N-1 事故情况下仍然能够得到满足。

电压水平限制:电能在流经输电线时,通常情况下会导致线路末端的电压降落,而在配电系统中必须时时将各节点的电压维持在一个特定的范围内,以保证供电质量。电压水平限制规定了系统内各节点所能允许的最低、最高电压。

电压稳定极限:区域电网系统可靠性设计的一个基本原则就是要保证系统在发生故障时,能够继续保持可靠的运行。并且 N-1 故障下系统的安全约束仍然不能被破坏。

以上约束条件随时间发生变化,计算时需要注意。

1.3 无功能力指标数学模型

电压稳定问题可以看成是静态电压稳定性问题,因此电力系统的可行电压水平边界和临界点处无功需求值的计算可作为一个静态非线性优化问题来求解。考虑如下形式的非线性规划问题。

$$\begin{cases} \min \xi(x) \\ f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ \underline{G} \leq G(x) \leq \bar{G} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $x \in R^n$ 为状态控制变量;

$h(x) = [h_1(x), \dots, h_m(x)]^T$ 为常规潮流方程;

$G(x) = [G_1(x), \dots, G_m(x)]^T$ 为安全约束条件;

\underline{G}, \bar{G} 为安全约束条件上下限;

$\xi(x)$ 为目标函数。

根据不同的安全约束限制需要建立不同的数学模型。

模型一:电压幅值约束和热稳定约束优化模型

$$\begin{cases} \min \xi(x) \\ h(x) = 0 \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad i = 1, \dots, n \\ \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \quad i \in S_G \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} \quad i \in S_R \\ \underline{Q}_{rci} \leq Q_{rci} \leq \bar{Q}_{rci} \quad i \in S_C \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\xi(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} [(f_i - f_j)^2 + (e_i - e_j)^2]$ 为系统网损。

模型二:电压稳定约束优化模型

$$\min \xi(x) \begin{cases} f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} & i \in S_G \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} & i \in S_R \\ \underline{Q}_{rci} \leq Q_{rci} \leq \bar{Q}_{rci} & i \in S_C \\ 0 \leq V_i \leq \bar{V}_i \end{cases} \quad (7)$$

其中： λ 代表系统一定要保持的电压稳定裕度，这里取基态情况下总负荷功率的 20%。因此，考虑到系统故障前后的情况，对于所有安全约束的限制，计算区域电网无功能力指标可由式(8)表示。

$$\eta = Q_z / \max\{Q_r, \text{by}(6), Q_r, \text{by}(7)\} \quad (8)$$

2 原始一对偶内点法的求解

内点法^[17]是 Kamarkar(卡马卡)于 1984 年提出的一种具有多项式时间的非线性规划算法。文献 [17, 18] 详细介绍了内点法的基本原理，文献 [19, 20] 把内点法用于求解电力系统优化问题。近来对于求解非线性优化问题，广泛采用了原始一对偶内点法 PDIPM (primal-dual Interior point method)。将采用该方法来对无功能力的数学模型进行求解。由于篇幅有限，在此不再赘述。

原始一对偶内点法的主要步骤：①引入松弛变量将不等式约束转化为等式约束；②用拉格朗日方法将带约束的优化问题转化为无约束的优化问题；③利用 KKT 条件得到一系列的非线性方程；④利用牛顿法求解上述的非线性方程。

3 配电网可靠性指标

文献 [21] 指出配电系统最基本的可靠性指标有 3 个：负荷点平均故障率、平均停电时间以及年平均停电时间。系统可靠性常规计算指标，如系统平均停电频率 (system average interruption frequency indices SAIFI)、系统平均停电持续时间 (system average interruption duration indices SAIDI)、用户平均停电持续时间 (customer average interruption duration indices CAIDI) 和平均供电可用率指标 (average service availability indices ASAI)，可以由这 4 种可靠性指标计算

得到。可靠性成本效益指标，如期望缺电量 (expected energy not supply)、期望停电成本 (expected interruption cost) 和缺电损失评价率 (interruption energy assessment rate)，也可以从这 3 个指标计算得到。则选择只针对 4 种系统可靠性常规计算指标进行计算。

4 算例分析

4.1 算法步骤

(1) 建立和计算基本潮流方程；

(2) 用 PDIPM 计算式 (6)，得出故障前系统在电压水平约束和热稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r = \sum Q_i$ ；

(3) 用 PDIPM 计算式 (7)，得出故障前系统在电压稳定约束下的无功需求值 $Q_r = \sum Q_i$ ；

(4) $Q_{pre} = \max\{Q_r, \text{by}(2), Q_r, \text{by}(3)\}$ ；

(5) 用 PDIPM 计算式 (6)，得出故障后系统在电压水平约束和热稳定条件下的无功需求值 $Q_r = \sum Q_i$ ；

(6) 用 PDIPM 计算式 (7)，得出故障后系统在电压稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r = \sum Q_i$ ；

(7) $Q_{loss} = \max\{Q_r, \text{by}(5), Q_r, \text{by}(6)\}$ ；

(8) 求解电网的无功能力水平值；

$\eta = Q_z / \max\{Q_{pre}, Q_{loss}\}$

(9) 在“N-1”准则下对系统进行可靠性评估，并与原可靠性参数进行比较。

4.2 算例仿真

下面将选择 RBTS-Bus 6 的配电系统为试验系统，其系统接线见图 1。该系统有 4 条主馈线 (F1~F4)，而主馈线 F4 带有 3 条分支子馈线 (F5~F7)，该系统共有 40 个负荷点、2 938 个用户，平均负荷为

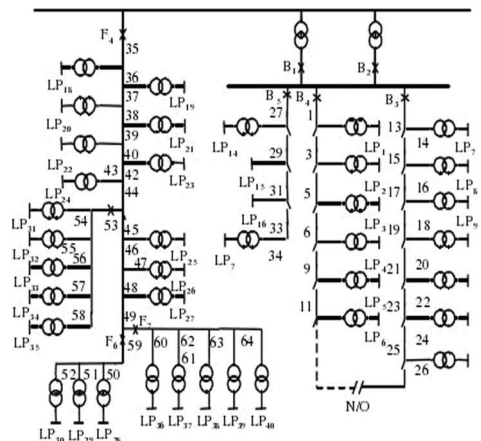


图 1 RBTS-Bus 6 配电系统接线图

10.715 5 MW。各元件参数与文献 [21, 22] 一致。

在本方法中, 变压器均无备用, 不考虑元件计划检修和隔离开关发生故障的情况, 同时假设断路器和熔断器都可靠工作。

用前面的方法对该馈线系统的仿真验证本方法的性能。

按照 RBTS—Bus 6 配电系统, 系统当前

$$Q_z = 10.7155 \times 10^{-2}$$

在静态情况下仿真, 故障前的结果见表 1。

表 1 系统故障前无功需求值

考虑不同约束条件下	RBTS—Bus 6 第 4 馈线 Q_r
电压幅值约束和热稳定约束	5.0577×10^{-2}
电压稳定约束	6.7936×10^{-2}

因此, 系统故障前在 RBTS—Bus 6 配电系统下,

$$Q_{pre} = \max\{5.0577 \times 10^{-2}, 6.7936 \times 10^{-2}\} \\ = 6.7936 \times 10^{-2}$$

表 2 给出了发生 N-1 故障情况下, 考虑电压幅值约束、热稳定约束和电压稳定约束的仿真结果。

表 2 考虑 RBTS—Bus 6 配电系统电压水平约束、热稳定约束和电压稳定约束的无功需求值

电压幅值约束和热稳定约束 开断支路号	电压稳定约束 Q_r
6	5.8321×10^{-2}
6	5.7152×10^{-2}
13	5.6523×10^{-2}
1	5.6032×10^{-2}
1	7.4986×10^{-2}
13	7.3695×10^{-2}
7	7.2367×10^{-2}
4	7.1963×10^{-2}

在 RBTS—Bus 6 配电系统下,

$$Q_{r(N-1)} = \max \begin{cases} 6, 5.8321 \times 10^{-2} \\ 1, 7.4986 \times 10^{-2} \end{cases} \\ = (1, 7.4986 \times 10^{-2})$$

上式为 (开断支路号, 无功需求值)

$$Q_r = \max\{Q_{pre}, Q_r(N-1)\} \\ = \max\{6.7936 \times 10^{-2}, 7.4986 \times 10^{-2}\} \\ = 7.4986 \times 10^{-2}$$

$$\eta = Q_z / Q_r = 10.7155 \times 10^{-2} / 7.4986 \times 10^{-2} \\ = 1.429$$

在以上结论的基础上对 RBTS—Bus 6 配电系统进行可靠性评估, 并与系统的原参数进行比较。计算结果如表 3。

表 3 RBTS—Bus 6 配电系统在 N-1 原则下的可靠性评估结果比较

算法	SAIFI 次 / (a·户) h	SAIDI h / (a·户) h	CAIDI h / (次·户)	ASAI
文献 [22]	1.0067	6.6688	6.6247	0.9992
本文	1.0122	6.6712	6.6955	0.9972

表 3 将 RBTS—Bus 6 配电系统在不功能力评估的前提下所得可靠性评估结果与原系统的结果做出了比较。结果表明当系统的无功能力越大时 (即系统提供的无功越充裕), 配电系统的可靠性就越好; 反之, 配电系统的可靠性将会受到一定的影响。以此表明电力系统无功能力的好坏将直接影响到配电网的可靠性。仿真结果表明把电力系统无功能力评估运用到配电网可靠性评估之中是可行的。

5 结论

将一种考虑电网电压水平、电压稳定及线路热稳定约束情况下求解区域电网无功能力的计算方法运用到配电网的可靠性评估之中, 并在各种预想的 N-1 网络故障情况下, 利用原始一对偶内点法进行求解, 得到了在电压水平约束、电压稳定约束和热稳定约束情况下区域电网的无功能力值。通过对 RBTS—Bus 6 配电系统仿真计算, 表明了电力系统的无功能力的好坏将会对配电网的可靠性造成影响, 配电网的可靠性将会随着系统的无功水平的变化而产生相应的变化。从而证明了此方法具有可行性、准确性和实用性。

参考文献

- [1] 周家启, 任震. 电力系统可靠性评估 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986.
- [2] 杨晓东, 栗然, 吕鹏飞, 等. 配电网可靠性评估算法 [J]. 电流环境保护, 2002, 18(4): 33-36.
- [3] 李少华, 韩富春. 配电系统可靠性评估新方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(6): 17-19.
- [4] Billinton Roy, Wang Peng. Teaching Distribution System Reliability Evaluation Using Monte Carlo Simulation [J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(2): 397-403.
- [5] Billinton Roy, Wang Peng. Reliability-network-equivalent Approach to Distribution-system-reliability Evaluation [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(2): 149-153.

(下转第 86 页)

止错用、混用及油质劣化。

3.3 提高系统检修质量

检修时,应彻底清洗油系统的污染物,清洗后用面沾掉残余物质。调速器的伺服阀、错油门滑块和油动机有腐蚀点时,必须彻底清除,或将部件更换。机组大小修时更换伺服阀的滤网,一个大修期更换 1 次 EH 油系统的 O 型密封圈,确保一个小修期检查 1 次 EH 油冷却器泄漏情况和管壁的腐蚀情况。油箱、滤网应擦洗干净,精密滤芯如堵塞时应更换。

3.4 油系统的合理设计和安装

将空气过滤、除湿装置装入 EH 油箱顶部呼吸器内,降低油中含水量;EH 系统元件特别是管道应远离高温区域,严格控制保温材料的质量,保证足够的保温层厚度以降低汽缸及高、中压调门的热辐射温度;增加抗燃油的流动,尽量避免死油腔,由值长统一

调度每值当班人员对电调机组的负荷进行调整,防止油动机活塞底部的高温抗燃油长时间囤积,形成死区后加速其恶化。

参考文献

- [1] 李焯峰,刘永洛,严涛,等. 900 MW 核发电机组抗燃油系统污染原因分析 [C]. 第四届全国火力发电技术学术年会论文, 2003.
- [2] 李焯峰,魏洪波,程虹,等. 抗燃油在线再生处理新技术 [C]. 第四届全国火力发电技术学术年会论文, 2003.
- [3] 尤卓越. 国产 600 MW 机组抗燃油系统常见故障分析及应对措施 [J]. 江苏电机工程, 2008, 27(4): 20-21.

(收稿日期: 2011-01-07)

(上接第 51 页)

- [6] 杨文字,余建明,同向前. 基于最小割集的配电系统可靠性评估算法 [J]. 西安理工大学学报, 2001, 217(4): 387-391.
- [7] 张鹏,郭永基. 基于故障影响分析法的大规模配电系统可靠性评估 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(3): 353-357.
- [8] 李卫星,李志民,刘迎春. 辐射状配电系统的可靠性评估的故障遍历算法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 27(2): 53-56.
- [9] 郭永基. 考虑容量约束的配电系统可靠性评估 [J]. 电力系统自动化, 2000, 23(2): 48-52.
- [10] 方勇. 区域电网无功能力研究 [D]. 成都: 四川大学, 2008.
- [11] Zabian 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 System, 1996, 11(2): 929-938.
- [12] Mao Jian-feng Zhao Qian-chuan Christos G. Optimal Dynamic Voltage Scaling in Power-limited System with Real-time Constrains [A]. 43rd IEEE Conference on Decision and Control 2004, 1472-1477.
- [13] 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.
- [14] 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, 2004.
- [15] Obadinao O, Beng G J. Determination of Voltage Stability Limit in Multinachine Power System [J]. IEEE Trans On

Power 1988, 3(4).

- [16] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] Kamakar N K. A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming [J]. Combinatorica 1984(4): 373-395.
- [18] 赖炎连. 线性规划的 Kamakar 方法 [J]. 咸宁学院学报, 2004, 24(6): 1-3.
- [19] 赖炎连. 线性规划的 Kamakar 方法 (续) [J]. 咸宁学院学报, 2005, 25(3): 1-4.
- [20] 王良缘,吴政球,傅海燕,等. 电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(1): 28-33.
- [21] Allen R N, Billinton R, Sjarief I et al. A Reliability Test System for Educational Proposes Basic Distribution System Data and Results [J]. IEEE Transactions On Power System, 1991, 6(2): 813-820.
- [22] Billinton R, Johnnavithula S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment [J]. IEEE Trans On Power System, 1996, 11(4): 1670-1676.

作者简介:

高 岩 (1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及电压无功控制;

李华强 (1965), 男, 教授, 硕士生导师, 从事电压稳定及优化问题研究;

林茂君 (1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及电压无功控制。

(收稿日期: 2011-01-17)