

基于电压稳定预想事故的快速输电能力分析

叶剑烽, 方鸽飞, 倪涌炯
(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 以连续潮流技术为基础, 提出了考虑鞍点分叉造成的静态电压稳定性约束下的电力系统输电能力的快速分析与计算。考虑到输电线路和发电机故障对系统静态电压稳定性的影响, 以电压稳定性指标进行预想事故选择, 并用连续潮流法计算得到 $N - 1$ 安全约束下的系统输电能力。经过 IEEE 9 节点和 30 节点算例的分析, 表明此方法是简洁、快速和可靠的。

关键词: 输电能力; 预想事故; 电压稳定性指标

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)06-0018-03

0 引言

近些年来, 随着电力系统的不断发展, 迫切需要充分利用现有输电网络的输电能力, 最大限度降低运行成本, 提高系统运行的经济效益。但是随着传输功率的增大, 互联电网对电力系统扰动的承受能力却在逐渐减小, 这给互联电力系统带来了很大的安全隐患。因此对于一个大型互联电力系统, 如何准确地确定电力系统的功率输送能力, 使系统在满足安全性及可靠性的约束条件下, 最大限度地满足各区域的用电负荷需求, 已成为现代电力系统亟待解决的研究课题。

根据北美电力系统可靠性委员会 (简称 NERC) 给出的定义^[1], 所谓一个系统两区域间的输电能力, 是指在满足一定约束条件下, 通过两区域间的所有输电回路, 从一个区域向另一个区域可能输送的最大功率。按照 NERC 建议的计算框架, 输电能力的计算需要考虑三种约束: 电压约束, 设备过负荷约束, 静态、动态和暂态等在内的各种稳定极限约束。这里静态安全约束为“ $N - 1$ 准则”。

输电能力的计算方法大体上可以分为确定性的求解方法和基于概率的求解方法两大类。确定性的方法主要包括线性分布因子法 (LDF)^[2]、连续潮流法 (CPF)^[3]、最优潮流法 (OPF)^[4]、灵敏度分析法^[5] 等。概率性的方法主要包括随机规划法、枚举法、蒙特卡洛模拟法等。建立在连续型潮流计算基础上的方法既可以考虑如电压水平、线路及设备过负荷等静态安全性约束条件, 也可以考虑由于潮流方程解的鞍点分叉导致的电压稳定性约束条件以及其它动态约束条件的影响, 具有重要的实用价值。在本文

中也是采用连续潮流法进行输电能力计算的。

由于计算电力系统输电能力时不仅要考虑系统的正常运行方式, 而且要考虑各种故障情况的影响。而实际电力系统存在大量的不同故障方式, 对所有的故障进行分析是不现实的, 也是不必要的。因此我们首先需要进行严重故障识别, 找到对系统输电能力影响比较大的故障集^[6,7]。本文的主要想法是通过预想事故后的电网潮流, 计算预想事故下的电压稳定性指标, 通过对指标的排序来得到一些事故后电压最接近的崩溃的事故, 对排序得到的严重事故集再用连续潮流法计算精确的电压崩溃点。由于指标的计算无需迭代, 运算量小, 因此可以大大减少计算“ $N - 1$ 安全约束下系统输电能力所需的时间, 经过 IEEE 9 节点和 30 节点算例的分析, 表明此方法是比较可靠的。

1 电压稳定性指标

近年来, 世界上一些大电网相继发生过多起电压崩溃性事故, 纵观这些事故, 可以发现, 其中多起都是由于电网承受重负荷时线路发生故障引起的, 因此, 研究故障对电压稳定性的影响, 并根据其严重程度采取相应的对策, 确保系统具有一定的裕度, 对保证电网的安全运行具有重要的意义。下面提出一种较新颖的基于电压稳定性的事故排序方法。

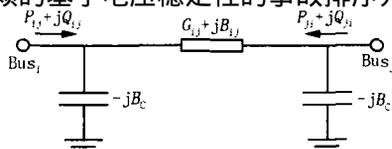


图1 简单电力系统线路

Fig 1 Simple system branch

首先考虑单一线路模型(如图1),不考虑对地电容时,电路末端的无功功率为

$$Q_{\bar{i}} = -B_{ij}V_j^2 + V_iV_j(B_{ij}\cos\theta_{ij} + G_{ij}\sin\theta_{ij})$$

考虑对地电容时

$$Q_{\bar{i}} = -(B_{ij} + B_C)V_j^2 + V_iV_j(B_{ij}\cos\theta_{ij} + G_{ij}\sin\theta_{ij})$$

通过变换,可以把上式转化成一关于 V_j 的二次多项式:

$$(B_{ij} + B_C)V_j^2 - (B_{ij}\cos\theta_{ij} + G_{ij}\sin\theta_{ij})V_iV_j + Q_{\bar{i}} = 0$$

要使上式有实数解,必须其判别式大于等于零,

即

$$[(B_{ij}\cos\theta_{ij} + G_{ij}\sin\theta_{ij})V_iV_j]^2 - 4(B_{ij} + B_C)Q_{\bar{i}} \geq 0$$

于是定义电压稳定指标 L 为:

$$L = \frac{4(B_{ij} + B_C)Q_{\bar{i}}}{[(B_{ij}\cos\theta_{ij} + G_{ij}\sin\theta_{ij})V_iV_j]^2} \quad (1)$$

L 可根据潮流计算所得的电压幅值、角度和线路的无功功率进行简单的运算后就能得到,无需进行迭代,运算量较小。可知当 L 越接近1,说明此线路末端的电压越接近崩溃,因此可以根据此指标来判别线路末端电压接近崩溃的程度。

2 基于电压稳定性的预想事故排序方法

本文的主要想法是通过预想事故后的电网潮流,计算预想事故下的电压稳定性指标,通过对指标的排序来得到一些事故后电压最接近的崩溃的事故,对排序得到的严重事故集再用连续潮流法计算精确的电压崩溃点。

首先计算基态潮流状况下各线路的稳定指标 L_m^{pre} ,再对于某一事故 l 计算事故后各线路稳定指标 L_m^{post} , $m=1,2,\dots,n_l$,其中 n_l 为事故 l 发生后系统的剩余的支路数。

文献[8]提出用 $PI_l = \max_m \{L_m^{\text{post}}\}$ (方法一)作为事故 l 严重程度的指标,这里对上述方法进行了改进,提出 $PI_l = \max_m \{L_m^{\text{post}} - L_m^{\text{pre}}\}$ (方法二),即选出事故 l 后线路稳定指标变化最大的一个作为此事故的严重程度的指标,根据各事故后 PI_l 的大小进行事故排序, PI_l 值越大的说明事故 l 对各节点的电压稳定性影响最大。

现以IEEE9母线系统为例,按 $PI_l = \max_m \{L_m^{\text{post}} - L_m^{\text{pre}}\}$ 对各预想事故进行排序,此排序方法不仅能考虑线路开断事故,也能考虑发电机开断事故。

为了准确比较所用的排序方法的精度,首先对整个支路进行准确的事故排序(开断后会形成“孤岛”的线路不参加事故排序和线路开断分析)。一条支路

(或发电机)的事故所对应的鞍点值可以通过切除该支路(或发电机)后,再利用连续潮流求得解曲线的鞍点来精确的计算,这里只考虑负荷和发电机的增加方向按基态运行状况下的功率因数进行增长的情况。所得到的电压崩溃鞍点值越小表明该事故越严重。考虑上述系统的一次事故后所得准确排序表和根据本文提出的排序方法的结果如表1所示。

表1 各排序方法的事故排序表

Tab 1 Contingency ranking according to some methods

所发生的事故	精确排序号	方法一	方法二
4-5	1	1	1
4-6	2	2	2
5-7	3	5	4
7-8	4	4	3
2号发电机	5	3	5
6-9	6	7	7
3号发电机	7	6	6
8-9	8	8	8

由表1可以看出,本文提出的基于电压稳定指标的排序方法能较好地捕获前几位的事故,算法简单,是一种较好的事故筛选方法。

3 基于连续潮流法的输电能力的分析

当系统中发电机功率或者负荷发生缓慢变化,如果 P_0 和 Q_0 表示对应于系统当前状态下的节点有功和无功向量, P 和 Q 表示节点注入变化后的节点有功和无功向量,则可将系统潮流方程参数化为如下形式:

$$f(x, \lambda) = g(x) + b = 0 \quad (1)$$

其中: λ 为节点注入变化条件数, $b = [P - P_0, Q - Q_0]$ 为系统节点功率注入变化的方向向量,它决定了当母线注入条件数 λ 变化时,系统母线负荷以及发电机功率相应的变化模式。

连续潮流法解决问题的方法就是从一已知点 (x_0, λ_0) 开始,在所需要的参数变化方向上获得 $x(\lambda)$ 曲线上一系列的点 (x_i, λ_i) 。最常用的连续型方法又称预测-校正方法。其主要思想是:在已知 $x(\lambda)$ 曲线上点 (x_{i-1}, λ_{i-1}) 情况下,用简单的方法获得 (x_i, λ_i) 的近似点,例如点 $(\bar{x}_i, \bar{\lambda}_i)$,然后以该近似点作为初始点,采用一些非线性方程的求解方法获得式(1)的准确解 (x_i, λ_i) 。其中,获得点 $(\bar{x}_i, \bar{\lambda}_i)$ 的过程称为预测过程,获得点 (x_i, λ_i) 的过程称为校正过程。

本文以IEEE30节点系统为例,进行系统输电能力的计算和分析。其中约束条件仅考虑了由潮流

方程鞍型分叉点所诱导的电压稳定性约束。在正常运行情况下,系统总的有功负荷为 283.40 MW,负荷和发电机的增加方向是按基态运行状况下的功率因数进行增长的。

为了选择严重事故,按照 $PI_i = \max_m \{L_m^{\text{post}} - L_m^{\text{pre}}\}$ 指标对各事故进行排序(开断后会形成“孤岛”的线路不参加事故排序和线路开断分析)。

表 2 事故排序及其最大输电能力

Tab 2 Contingency ranking and TTC

方法二	所发生的事故	精确排序	最大输电能力 /MW
1	1 - 2	1	337.25
2	2 - 5	5	621.21
3	9 - 10	6	657.49
4	27 - 28	2	410.93
5	4 - 12	7	663.16
6	27 - 29	4	620.25
7	13号发电机	9	728.34
8	6 - 8	11	739.67

根据表 2 的计算结果,可以看出本文提出的方法在 IEEE30 节点系统中能较好地筛选出严重事故,再对筛选出的严重事故进行连续潮流法求解从而得出满足 $N-1$ 故障校验的系统的最大输电能力为 337.25 MW。

4 结论

1) 作为电力系统区域间输电能力研究的前提,本文对系统严重事故的选择进行了研究,提出了基于电压稳定性的事故排序方法。该方法通过对系统中所有支路、发电机故障后的电压稳定指标的计算并事故排序。

2) 本文以连续潮流法为基础,对电力系统区域间的最大输电能力进行了研究,它是求解潮流方程鞍点分叉最可靠的方法,也可以考虑诸如线路、设备过负荷等静态安全约束以及其它动态约束条件,既可以考虑系统正常运行方式下的各种状态,也可以考虑各种事故情况下的影响,因而具有重要的实用价值。

3) 由于电力系统的复杂性,如何揭示 SVC、TC-SC 等 FACTS 控制装置,对系统鞍型分叉的影响,以及对区域间输电能力的影响,是当前电力市场环境

下一个重要的课题,对提高输电能力的研究更有价值,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Available Transfer Capability Definitions and Determination. A Reference Document Prepared by TTC Task Force[Z]. North American Electric Reliability Council, 1996.
- [2] Ejebe G C, Waight J G, Santos-Nieto M, et al. Fast Calculation of Linear Available Transfer Capability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1112-1116.
- [3] Flueck A J, Chiang H D, Shah K S. Investigating the Installed Real Power Transfer Capability of a Large Scale Power System Under a Proposed Multi-area Interchange Schedule Using CPFLOW[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 883-889.
- [4] Tuglie E D, Dicorato M, Scale M L, et al. A Static Optimization Approach to Assess Dynamic Available Transfer Capability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1069-1076.
- [5] 刘皓明,严正,倪以信,等.快速计算电网可用输电能力的交流灵敏度方法[J].电力系统自动化,2003,27(19):13-17.
- [6] LU Hao-ming, YAN Zheng, NI Yi-xin, et al. An AC Power Flow Based Sensitivity Method for the Fast Calculation of Available Transfer Capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 13-17.
- [7] 方鸽飞,黄晓烁,梁成红.考虑电压稳定的预想事故下最大输电能力分析[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(5):5-8,27.
- [8] FANG Ge-fei, HUANG Xiao-shuo, LIANG Cheng-hong. TTC Analysis in Contingency Based on Voltage Stability[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(5): 5-8, 27.
- [9] 梁成红,方鸽飞.可用传输能力的传输可靠性裕度分析[J].电工技术,2003,12.
- [10] LIANG Cheng-hong, FANG Ge-fei. Analysis on Transmission Reliability Margin in ATC[J]. Electric Engineering, 2003, 12.
- [11] Quintela A S, Castro C A. Improved Branch-based Voltage Stability Proximity Indices, Part II: Application in Security Analysis [A]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering (LESCOPE 2002). Halifax: 2002.

收稿日期: 2005-07-22; 修回日期: 2005-09-09

作者简介:

叶剑烽(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定性分析;E-mail: zjuyefm@163.com

方鸽飞(1955-),男,副教授,主要从事电力系统稳定分析与控制的教学与研究;

倪涌炯(1976-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定性分析。

Fast analysis of transfer capability in contingency based on voltage stability

YE Jian-feng, FANG Ge-fei, NI Yong-jiong

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(下转第 56 页 continued on page 56)

的呼叫分析的应答时间。

3) 系统自动数据传送可节省时间,减少错误。

4) GIS可使呼叫中心的代理和控制中心的调度员可视化,因此GIS的可用数据奏效了。呼叫中心的代理得到实时信息,其工作量也减少了。

5) 对已知的停电可最小化维修人员时间,减少恢复供电时间,因为可以直接调度维修人员到可能的故障设备。

6) 可提供准确地图的自动程序,将允许配电系统操作人员查看实时更新的系统地图。通过图形展示和系统地图的智能导航可节约在地图上翻阅的大量时间。

7) 能提供及时的信息给当前客户,传送停电信息和预安排停电通知。

8) 能对可能的可靠性指标作精确的计算。能确定电路拓扑数据的准确性和完备性。

参考文献:

- [1] 匡洪海,黄少先. 停电管理系统应用的探讨[J]. 国际电力, 2004, 8(3): 46-47.
KUANG Hong-hai, HUANG Shao-xian. A Discussion on Application of Outage Management Systems[J]. International Electric Power of China, 2004, 8(3): 46-47.
- [2] 袁其俊. 以专家系统支援用户停电管理的研究(硕士学位论文)

文)[D]. 广州:国立中山大学, 2003.

YUAN Qi-jun. Application of Expert Systems to Customer Outage Management, Thesis[D]. Guangzhou: National Sun Yat-sen University, 2003.

- [3] 匡洪海,黄少先. 配电网停电管理系统方案设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 71-74.
KUANG Hong-hai, HUANG Shao-xian. Design of the Outage Management System for Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 71-74.
- [4] Guven N, Ozay N, Tunab E. GIS Based Outage Analysis System for Electric Distribution Network[A]. Electrotechnical Conference, LEMECON. 1996. 761-764.
- [5] Hom R. Outage Management Applications and Methods[A]. Power Engineering Society Winter Meeting 1999. 866-869.
- [6] Tran H. Selection and Implementation of an Outage Management System[A]. IEEE PES Winter Power Meeting on Outage Techniques and Experiences 1999. 870-872.
- [7] Koch B. Distribution Outage Management: a Critical Part of Distribution Automation[J]. Electrical World, 1998: 45-50.

收稿日期: 2005-08-08

作者简介:

匡洪海(1972-),女,工学硕士,讲师,主要从事电力系统保护和配网停电管理的研究;E-mail: kkhzyz@163.com

肖伸平(1965-),男,工学硕士,副教授,主要从事控制工程与自动化方面的研究。

Analysis of outage management system

KUANG Hong-hai, XIAO Shen-ping

(College of Metallurgy, Hunan Polytechnic University, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: In the recent years, the kinds of devices of distribution network has increased a lot. It is a very difficult and time-consuming task to the operators of distribution to find the fault device for restoring service as quickly as possible. In order to find out fault location exactly and rapidly so that maintenance staff rushes to repair and restore service, many electric utilities are prepared for installing an outage management system (OMS) for their electric distribution operations. Developing a robust and scalable outage management system (OMS) is a new task for electric power industry. This paper details the application of distribution outage management systems.

Key words: distribution network; outage; outage management system

(上接第 20 页 continued from page 20)

Abstract: In this paper, a fast CPF-based transfer capability calculation model due to the voltage stability limit is discussed. Considering the impact of branch and generator outage contingency on system's voltage stability, contingency selection is performed through voltage stability proximity indices, and system transfer capability with $N-1$ security constraints is calculated by CPF method. The results of IEEE 9- and 30-bus systems show that the proposed method is simple, fast and effective.

Key words: transfer capability; contingency; voltage stability proximity indices