

电力系统电压稳定灵敏度分析方法

段献忠 袁 骏 何仰赞
(华中理工大学电力工程系 430074 武汉)

张德泉
(华中电管局调度局 430077 武汉)

摘 要 灵敏度分析是基于潮流方程的电压稳定性分析方法之一,文中对灵敏度指标进行了分类,提出了统一的计算方法,还给出了复杂系统的计算算例,探讨了实用简化计算的可行性,最后就电压稳定灵敏度分析的基本问题进行了讨论

关键词 电力系统 电压稳定 灵敏度分析方法

0 引言

灵敏度分析方法从定性的物理概念出发,利用系统中某些量的变化关系来分析稳定问题,因为其物理概念明确,计算简单,在电压稳定研究中得到越来越广泛的应用。Crisan O^[1]通过两个临近运行状态的灵敏度指标 dP_L/dV_L 来拟合 $P-V$ 曲线,从而得到临界功率,避免了临界状态计算的困难,并在灵敏度计算中考虑了负荷变化关系和发电机有功经济调度; Begovic M M^[2]利用灵敏度指标来比较负荷节点的电压稳定性,可以为安装无功补偿装置和采取切负荷措施提供指导; Flatabo N^[3]和 Carpentier J^[4]均利用灵敏度指标来计算系统的电压稳定性裕度指标; Quoc Tuan T^[5]提出了紧急情况下切负荷,避免电压失稳事故的灵敏度分析方法。电压稳定研究中最常见的灵敏度判据有 dV_L/dP_L , dV_L/dQ , dQ_G/dQ_L , dP_{LOSS}/dQ , dV_L/dV_g 等^[1~7]。灵敏度判据一般由简单系统中的定性分析得到,推广到复杂系统中,可以转化为某种形式的雅可比矩阵性质的判断,如是否为 M 阵,对角元素大于 0 等等^[7],也可以通过引入假设条件,仍然由两个变量的变化关系来作出判断。

目前电压稳定灵敏度指标的种类和计算方法已很多,本文的目的是对这些灵敏度指标进行分类,提出统一的计算方法,探讨灵敏度实用简化计算的可行性,并就灵敏度指标的物理本质、相互关系及其在电压稳定研究中的地位进行初步讨论,还将探讨提出新型灵敏度指标的基本思路。文中除特别注明

以外,灵敏度分析是指电压稳定灵敏度分析。

1 灵敏度分析的统一方法

1.1 数学模型

目前电压稳定研究中的灵敏度分析大部分是建立在潮流方程基础上的,不同文献中介绍的方法的不同之处,除了体现在所选用指标的差别外,还体现在对潮流方程变量的分类和其相互关系的处理上。基于潮流计算的灵敏度分析的基本方程是节点功率平衡方程:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

在灵敏度分析中,按照各变量的数学作用,可以将变量分为如下 4 类:

独立参数向量 α , 包括线路导纳参数 G, B 等不变化的量;

状态向量 $X = [V_L, \delta_L, \delta_g]^T$

控制向量

$$U = [P_L, Q_L, P_g, V_g, V_0, W_0, B, B_c \cdots]^T$$

$$\text{输出向量 } Y = [Q_g, P_0, Q_0, P_{LOSS}, Q_{LOSS} \cdots]^T$$

其中 B 表示有载调压变压器变比; B_c 表示并联电容补偿等的电纳; P_{LOSS} 和 Q_{LOSS} 分别为有功网损和无功网损; 下标“ L ”, “ g ”和“ 0 ”表示所对应的量为 PQ 节点、 PV 节点和平衡节点的量; i, j 表示节点号, 如 P_L 表示 PQ 节点的有功功率向量 $P_L = [P_{L1}, P_{L2}, \cdots, P_{Ln}]^T$, 其它变量的物理含义依此类推。

按照以上变量的划分,灵敏度分析的数学方程可以写为:

1996-09-23 收稿。

国家教委博士点基金资助项目 (9548718)。

©1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$F(X, U, \alpha) = 0 \quad (3)$$

$$Y = G(X, U, \alpha) \quad (4)$$

状态方程(3)中包括PQ节点的有功功率和无功功率平衡方程,以及PV节点的有功功率平衡方程,输出方程(4)中可以包含PV节点的无功功率方程、网损方程、平衡节点方程、支路潮流方程等各种输出方程

1.2 灵敏度指标的分类

目前的灵敏度指标很多,有反映负荷节点电压随负荷功率变化的指标 dV_{Li}/dP_{Li} 和 dV_{Li}/dQ_{Li} ; 有反映发电机无功功率随负荷功率变化的指标 dQ_{Gi}/dQ_{Lj} 和 dQ_{Σ}/dQ_{Lj} ; 反映网损功率随负荷功率变化和发电机出力变化的指标 dP_{Loss}/dP_{Li} 和 dQ_{Loss}/dQ_{Li} 等。此外,还有负荷节点电压对PV节点电压幅值的灵敏度,负荷电压对串并联电容补偿的灵敏度等。从下文可知,按照电压稳定灵敏度的物理本质,我们还可构造许多类型的灵敏度指标。但是,所有这些灵敏度指标,从数学上均可以分为两种类型:状态变量X对控制变量U的灵敏度 dX/dU 和输出变量Y对控制变量U的灵敏度 dY/dU ,前者简称为状态变量灵敏度,后者简称为输出变量灵敏度。

1.3 实用灵敏度分析方法

本文将忽略控制变量间相互关系的灵敏度计算称为实用灵敏度分析。方程(3)和方程(4)中对控制向量U求全微分,得到:

$$\frac{\partial F}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dU} + \frac{\partial F}{\partial U} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dY}{dU} = \frac{\partial G}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dU} + \frac{\partial G}{\partial U} \quad (6)$$

从(5)式、(6)式可以得到两种灵敏度矩阵的表达式:

$$\frac{dX}{dU} = - \left[\frac{\partial F}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial F}{\partial U} \quad (7)$$

$$\frac{dY}{dU} = - \frac{\partial G}{\partial X} \left[\frac{\partial F}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial F}{\partial U} + \frac{\partial G}{\partial U} \quad (8)$$

(7)式为状态变量灵敏度矩阵表达式,(8)式为输出变量灵敏度矩阵表达式,矩阵元素 $(dX/dU)_{ij}$ (或 $(dY/dU)_{ij}$) 即为第i个状态变量 X_i (或输出变量 Y_i) 对控制变量 U_j 的灵敏度 dX_i/dU_j (或 dY_i/dU_j)

1.4 严格灵敏度分析方法

控制向量U的各元素并不是严格独立变化的,它们的变化存在一定的相互关系,如当某个负荷节点的有功功率增长时,无功功率也会变化;当一个

负荷节点的功率变化时,其它负荷节点的功率也会变化;当负荷功率变化时,发电机出力也会按网损等微增率或别的原则进行调整。考虑控制变量之间的变化关系近来在电压稳定研究中得到了关注。不管控制变量之间的关系如何复杂,如果能够确切知道的话,总可以得到控制向量U与灵敏度计算中所关心的控制变量 U_k 之间的线性关系表达式 $\Delta U = A \Delta U_k$,或者说,全微分 $dU/dU_k = A$ 。控制变量和输出变量对控制变量 U_k 的灵敏度矩阵表达式为:

$$\frac{dX}{dU_k} = - \left[\frac{\partial F}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial F}{\partial U} \frac{dU}{dU_k} \quad (9)$$

$$\frac{dY}{dU_k} = \left[- \frac{\partial G}{\partial X} \left[\frac{\partial F}{\partial X} \right]^{-1} \frac{\partial F}{\partial U} + \frac{\partial G}{\partial U} \right] \frac{dU}{dU_k} \quad (10)$$

以上4种变量是从日常运行调度的角度划分的,当进行电网规划等计算时,独立参数中所包含的量也可能成为灵敏度分析中所考虑的量,即作为控制变量参与以上所进行的分析计算。

2 算例分析

作者对复杂系统和简单系统进行了大量的数值计算和解析计算,目的如下:(1)检验复杂系统各种灵敏度指标的准确性;(2)检验本文介绍的统一分析方法的正确性;(3)研究忽略控制变量变化的相互关系对灵敏度分析准确性的影响。

作者对复杂电力系统中临界负荷节点的各种灵敏度指标 dV_L/dP_L , dV_L/dQ_L , dV_L/dE_L , dQ_{Σ}/dQ_L , dP_{Loss}/dP_L , dQ_{Loss}/dQ_L 等随负荷功率的变化进行了大量计算。从起算点到临界点及以后的过渡过程按以下原则进行:负荷导纳按照给定的变化关系变化, $Y_L = Y_{L0} + \lambda \Delta Y_L$,发电机有功功率按照网损等微增率进行调整。图1~图4给出了按照实用灵敏度分析方法和严格灵敏度分析方法所求得

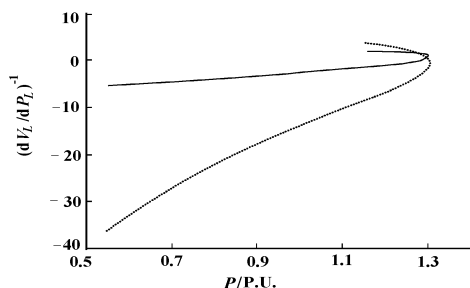


图1 两种方法求得的 dV_L/dP_L 曲线
虚线: 实用方法 实线: 精确方法

Fig. 1 The dV_L/dP_L curves calculated by two methods

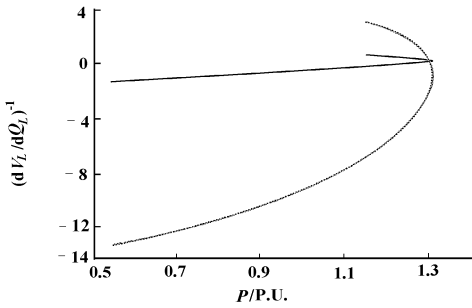


图2 两种方法求得的 dV_L/dQ_L 曲线
虚线: 实用方法 实线: 精确方法

Fig. 2 The dV_L/dQ_L curves calculated by two methods

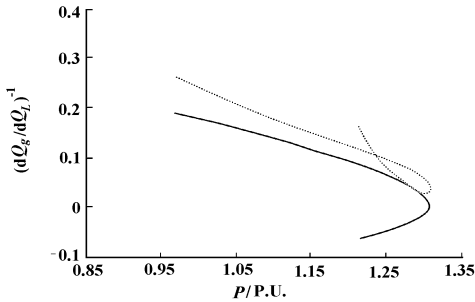


图3 两种方法求得的 dQ_g/dQ_L 曲线
虚线: 实用方法 实线: 精确方法

Fig. 3 The dQ_g/dQ_L curves calculated by two methods

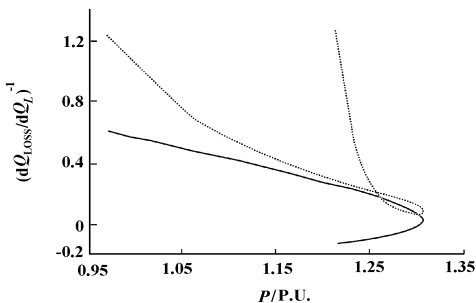


图4 两种方法求得的 dQ_{Loss}/dQ_L 曲线
虚线: 实用方法 实线: 精确方法

Fig. 4 The dQ_{Loss}/dQ_L curves calculated by two methods

的灵敏度曲线的一组对照图。为了方便,图中绘出的均是各类灵敏度指标的倒数。分析这些曲线可以得出以下结论:

(1) 本文介绍的灵敏度分析方法所求得的灵敏度指标曲线符合物理概念,且与 $P-V$ 曲线所求得的临界功率相吻合,说明本文介绍的方法是正确的。按照本文介绍的方法将灵敏度判据推广到复杂系统所求得的临界状态准确,与按矩阵性质来判断电压稳定性^[2]相比,本文方法更加合理。

(2) 只要计算方法正确,不同的指标所求得的

临界点相同,且线性性相差不大,只从作为电压稳定安全指标的角度来看(不考虑无功补偿选点、切负荷选点等因素),各类指标性能相近。

(3) 实用分析方法所求得的临界点有一定的误差,但是误差不大,严格分析方法所求得的临界功率为 1.307 9,实用分析方法所求得的临界功率为 1.302 5,误差小于 0.5%。另外,在过渡过程的各个状态中,实用分析方法和严格分析方法所求得的灵敏度指标数值上有很大的差距,但是从电压稳定灵敏度分析来看,重要的是临界点的准确性和灵敏度曲线的线性性,从工程应用的角度来看,可以采用实用分析方法代替严格分析方法。这一点对于灵敏度分析方法在电压稳定研究中的应用具有重要意义,因为严格分析方法中所考虑的控制变量变化关系在实际中是难以准确获得的,如果该因素对灵敏度分析精度有较大影响,则意味着电压稳定灵敏度分析方法在实用方面存在困难。

3 关于灵敏度分析方法的讨论

限于篇幅,这里仅就作者对电压稳定灵敏度分析方法的一些观点和研究结果作简要阐述。

(1) 电压稳定灵敏度分析方法属于基于潮流方程的静态研究方法,其与电压稳定性的确切关系需要从动态角度加以检验,其物理本质是把系统向负荷高压母线输送功率的极限能力作为电压稳定临界状态,抓住反映临界状态的不同灵敏度作为安全指标。其与其他基于潮流方程的研究方法,如潮流多解、常规潮流方程雅可比矩阵奇异、最大功率法等具有内在联系,需要进一步研究这些静态方法之间的关系。文献[8]的分析表明,简单系统中这些方法严格一致,复杂系统的算例也表明这些方法相同,但缺乏严格的理论证明。

(2) 不管是无功灵敏度,还是有功灵敏度,其线性性和临界点计算结果均相差不大,无功灵敏度指标比有功灵敏度指标数值大,但是在作为安全指标方面并不具有特别的优势。无功功率大小和传输途径的改变对电压幅值的影响比有功功率大,并不等于无功功率灵敏度在电压稳定分析各个方面具有优势。

(3) 根据灵敏度反映极限输送能力的思想,可以构造各类新的灵敏度,如:网损对支路参数的灵敏度,以利于寻找薄弱支路;动态负荷功率对电压的灵敏度,可以考虑负荷内部状态的影响,克服基

于潮流方程的研究方法的缺陷, 提高灵敏度分析的精度

(4) 灵敏度指标属于状态指标, 只利用所给定运行状态的信息进行电压稳定性分析, 不能考虑以后过程中发电机无功越限等不连续因素的影响, 如何考虑这些因素, 是提高灵敏度分析方法精度的关键之一。

4 结论

本文在总结各类灵敏度指标和计算方法的基础上, 将灵敏度指标分为状态变量指标和输出变量指标, 并给出了统一的计算方法。算例表明本文计算方法正确, 在工程计算中可以选择忽略控制变量变化关系的实用分析方法, 对分析精度影响很小, 这一结论对于电压稳定灵敏度分析方法在工程中的应用具有重要意义。

5 参考文献

- 1 Crisan O, Liu M. Voltage Collapse Prediction Using an Improved Sensitivity Approach. *Electric Power Systems Research*, 1994, 28 181~ 190
- 2 Begovic M M. Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis. *IEEE Trans, PWRs-* 1, 1992, (1)

- 3 Flatabo N, Fosso O B. A Method for Calculation of Margins to Voltage Instability Applied on the Norwegian System for Maintaining Required Security Level. *IEEE Trans, PWRs-* 8, 1993, (3)
- 4 Carpentier J. Voltage Collapse Proximity Indicators Computed from an Optimal Power Flow. *PSCC*, 1984
- 5 Quoc Tuan T, Fandino J. Emergency Load Shedding to Avoid Risks of Voltage Instability Using Indicators. *IEEE Trans, PWRs-* 9, 1994. 2, (1)
- 6 Borremans P, Clalvar A. Voltage Stability-Foundational Concepts and Comparision of Practical Criteria. *CIGRE*, 1984. 8
- 7 Schuelter R A. Voltage Stability and Security Assessment. *EPRI EL-* 5967, 1988. 8
- 8 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标. *电力系统自动化*, 1994, 18(9)

段献忠, 男, 1966年生, 博士, 副教授, 主要从事电压稳定和 FACTS 的研究工作。

袁 骏, 男, 1971年生, 硕士研究生, 主要从事电压稳定的研究工作。

何仰赞, 男, 1933年生, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析的研究工作。

张德泉, 男, 1964年生, 主要从事电力系统继电保护和稳定分析的工作。

SENSITIVITY ANALYSIS METHODS ON VOLTAGE STABILITY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Duan Xianzhong, Yuan Jun, He Yangzan (Huazhong University of Science & Technology, 430074, Wuhan, China)

Zhang Dequan (Central China Power System Control Center, 430077, Wuhan, China)

Abstract The sensitivity analysis is one of voltage stability analysis methods based on power flow equation. The sensitivity indices are classified in this paper. A unified calculation method is put forward and numerical example in complex systems is given to verify the sensitivity analysis theory. Simplified calculation method is supposed for practical analysis. Some fundamental issues on sensitivity analysis of voltage stability are discussed.

Keywords electric power system voltage stability sensitivity analysis method

(上接第 5 页)

THE DISPOSAL OF SPECIAL LOAD STAGES IN DYNAMIC OPTIMAL DISPATCH

Pan Yi, Liu Zhuo (Harbin Institute of Technology, 150001, Harbin, China)

Yu Erkeng, Liu Guangyi (Electric Power Research Institute, 100085, Beijing, China)

Abstract In this paper, the characteristics of the special load stages and the problems probably occurred in dynamic optimal dispatch are analyzed. The idea of transmitting the information of the stage ahead to the stage behind is put forward and the guiding-backwards constraints are presented. Using this regulating tactics, the requirements of the stage ahead are transmitted to the stage behind and the dynamic optimal dispatch is solved successfully. The theory and algorithm of dynamic optimal dispatch becomes more perfect by this method.

Keywords dynamic optimal dispatch guiding-backwards constraints special load stages