

一种计算电压稳定边界的两阶段潮流方法

牟晓明,李志民

(哈尔滨工业大学 电气工程系,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种具有解析性质且能近似用于描述系统电压稳定性的特征指标,基于该指标提出一种计算电压稳定边界的两阶段混合潮流方法。在阶段1中,利用二分法原理确定重复潮流计算过程中的功率增长步长,快速求出系统的近似电压稳定边界;在阶段2中,采用连续潮流技术对电压稳定边界进行精确计算;在整个计算过程中,利用提出的特征指标识别系统是否已经接近于极限运行状态,进而判别何时进行阶段1和阶段2的更换。仿真结果表明,所提方法可以减少潮流计算的次数,从而提高电压稳定边界的计算速度。

关键词: 电力系统; 稳定性; 连续潮流; 步长控制; 两阶段算法

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.012

0 引言

近年来由于电压稳定事故的频繁发生及各种间歇式能源的大规模并网,使得电力系统的静态电压稳定问题受到了学术界及电网运行和规划部门的高度关注。静态电压稳定分析是电力系统运行和规划中的重要工作之一,对电力系统的安全运行具有重要意义。

目前为止,静态电压稳定分析方法主要包括奇异值(特征值)分解法^[1-2]、直接法^[3-5]、戴维南等值法^[6-9]、连续潮流法^[10-18]、最优潮流法^[19-20]、混合法^[21-23]等。其中,基于连续潮流的 $P-U(Q-U)$ 曲线法,由于能给出电压稳定裕度信息,且能模拟系统在过渡过程中的各种物理约束、发电机有功分配、负荷增长方式等因素,并能克服潮流在临界点的发散问题,因而被广泛应用于工业实践。但如何进行步长控制是连续潮流计算中的一个关键环节^[24]。选择一个恒定的小步长可以获得较精确的解,但是小步长会导致多次的潮流计算;较大的步长会引起预测点与实际点的较大偏离,从而增加校正过程的计算时间。

研究表明,将常规潮流与连续潮流相结合,可以达到快速、准确计算电压稳定边界的目的。首先从基本工况逐步增加负荷,利用潮流求解方法,跟踪计算至崩溃点附近;然后利用连续潮流跟踪计算至崩溃点。但在常规潮流计算阶段,如何设计一个有效的步长增长策略,是一个需要考虑和解决的重要问题。

文献[25]基于网络等值和阻抗匹配概念,建立了一个用于确定步长增长的阻抗比指标及相应的电压稳定边界计算方法。研究表明,该方法可以快速地将系统运行状态计算至崩溃点附近;但在临近崩溃

点处,该方法有时会失去作用。基于文献[25]的成果及存在的问题,本文提出一种近似用于描述系统电压稳定性的特征指标及计算电压稳定边界的两阶段混合潮流算法。

本文方法将电压稳定边界的计算过程分成2个阶段:在阶段1中,利用提出的电压稳定指标及二分法原理,确定常规潮流计算阶段中的功率增长步长,快速求出系统的近似电压稳定边界;在阶段2中,采用连续潮流方法,对电压稳定边界进行精确计算。在整个计算过程中,可以通过提出的电压稳定指标识别当前系统是否已经接近于极限运行状态,以及是否需要进行阶段1和阶段2的更换。

1 一种近似描述系统电压稳定性的解析指标

由电路理论可知,对于任一包含 n 个负荷节点的电力网络,均可以写出负荷节点电压方程:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} - Z \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, U_i 和 I_i 分别为负荷节点 i 的电压和电流相量, Z 为收缩到负荷节点的系统网络阻抗矩阵, E_i 为各负荷节点均开路时负荷节点 i 的电压相量。

以负荷节点 i 为例,可以写出下面的等值方程:

$$U_i = E_i - Z_{eq,i} I_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$Z_{eq,i} = \sum_{j=1}^n Z_{ij} \frac{I_j}{I_i} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

其中, $Z_{eq,i}$ 为与负荷节点 i 对应的等值阻抗; Z_{ij} 为矩阵 Z 的第 i 行第 j 列元素。

研究表明,在最大传输功率条件下,各负荷阻抗 Z_i 与相应等值阻抗 $Z_{eq,i}$ 满足一种特殊的阻抗匹配条件:

$$Z_i = \sum_{j=1}^n Z_{ij}^* \frac{I_j}{I_i} \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

收稿日期:2012-04-28;修回日期:2012-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50807009)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50807009)

尽管实际电力系统不可能运行在式(4)所描述的阻抗匹配条件下,但这一阻抗匹配形式仍具有一定的理论意义和应用价值。本文试图研究如何利用该等值阻抗进行电压稳定边界求解过程中的步长控制,定义了如式(5)所示的特征指标:

$$r_{\min} = \min \left[r_i = \left| \frac{Z_i}{\sum_{j=1}^n Z_{ij}^* \frac{I_j}{I_i}} \right| \right] \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

在实际电网量测系统和潮流计算结果中,一般仅给出节点电压和电流相量信息,而式(5)中并不显示与电压稳定有直接关系的节点电压量测信息。因此,对式(5)进行变换是很有必要的。本文给出了式(5)的另一种表达形式,如式(6)所示:

$$r_{\min} = \min \left[r_i = \left| \frac{U_i}{\sum_{j=1}^n Z_{ij} I_j} \right| \right] \quad i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

其中, r_i 为负荷节点电压与所有负荷电流在相应网络阻抗上引起的累积电压降的比值, U_i 为负荷节点 i 的电压。指标 $r_{\min}$ 可以近似地用于描述系统的电压稳定性。

为了研究指标 $r_{\min}$ 所具有的特性,已经做了大量的算例仿真与分析。图 1 和图 2 分别给出了 IEEE 30 节点系统和 Polish 2746 节点系统的仿真结果(系统结构图和基态潮流数据见文献[26])。在仿真计算中,所有负荷被假设为恒功率负荷,且以一个共同的比例因子增加。所有负荷节点的电压和电流信息均由 MATPOWER 程序计算得出。

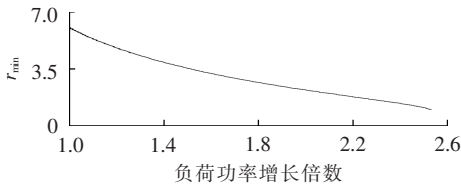


图 1 不同负荷条件下 IEEE 30 节点系统的指标 $r_{\min}$

Fig.1 Index $r_{\min}$ of IEEE 30-bus system for different load conditions

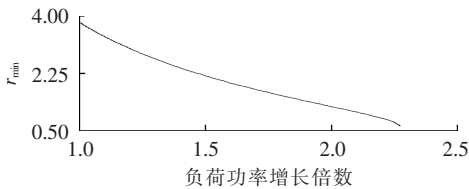


图 2 不同负荷条件下 Polish 2746 节点系统的指标 $r_{\min}$

Fig.2 Index $r_{\min}$ of Polish 2746-bus system for different load conditions

从图 1 和图 2 可以看出,当系统负荷较轻时,式(6)的分子较大、分母较小,指标 $r_{\min}$ 较大。随着系统负荷的增加,式(6)的分子会逐渐减小,而分母逐渐变大,因此指标 $r_{\min}$ 呈下降趋势。在崩溃点附近, $r_{\min}$ 通常会小于 1,且下降速度相对较快。当运行点离崩

溃点较远时,指标 $r_{\min}$ 通常会大于系统负荷所能增加的最大增长倍数的 2 倍。

应该指出的是,式(3)中的等值阻抗并不是戴维南等值阻抗,它将系统中其他所有负荷对被等值电路的影响都作用于等值阻抗,本质上这些影响应该既作用于等值阻抗也作用于等值电势。因此,式(3)的等值阻抗会比真实的戴维南等值阻抗大。这也从理论上解释了为何 $r_{\min}$ 在崩溃点附近通常会小于 1。

2 两阶段电压稳定边界计算方法

尽管指标 $r_{\min}$ 可以近似地用于描述系统的电压稳定性,但该指标不能提供电力系统运行人员所熟知和关注的功率裕度信息,因而不便于被电力工程人员所采用。指标 $r_{\min}$ 的优点在于其解析性,不需要潮流迭代,计算速度快。因此,将其与连续潮流计算方法相结合,用于潮流计算功率增长步长控制,兼顾了二者的优点,具有理论和应用价值。

以图 3 所示的 $P-U$ 曲线和 $P-r_{\min}$ 曲线示意图为例,对本文方法进行简要介绍和说明。图中根据 $r_{\min}$ 的大小,将负荷功率 P 分成 3 个区段:区段 1 中 $r_{\min} > 1+t_{ol}$ (t_{ol} 为一指定的较小值,如 1.05 等);区段 2 中 $1 < r_{\min} < 1+t_{ol}$;区段 3 中 $r_{\min} < 1$ 。

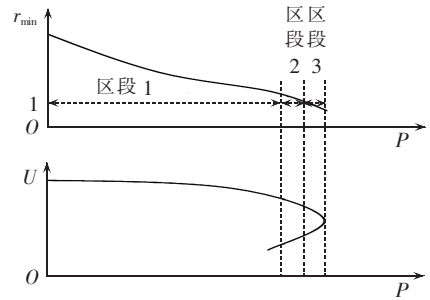


图 3 $P-U$ 和 $P-r_{\min}$ 曲线示意图

Fig.3 Schematic diagram of $P-U$ and $P-r_{\min}$ curves

在区段 1,如果采用连续潮流或常规重复潮流方法,计算速度可能会比较慢。直观上,在该区段, $r_{\min}$ 可以直接选作功率增长步长。然而,由图 1 和图 2 的仿真结果可知,当系统远离崩溃点时, $r_{\min}$ 作为步长通常会使系统处于崩溃点之外,此时系统潮流不收敛。因此,本文采用以下步长更新方式:

$$L_{am}(k+1) = \frac{1+r_{\min}}{2} L_{am}(k) \quad (7)$$

其中, $L_{am}(k)$ 为当前状态的负荷增长因子, k 为当前状态。

在实际计算中,式(7)中的 $L_{am}(k+1)$ 仍可能使系统处于崩溃点之外。在这种情况下,本文以 $L_{am}(k)$ 为起点、 $L_{am}(k+1)$ 为终点,利用二分法回找系统运行点:

$$L_{am}(k+2) = \frac{L_{am}(k) + L_{am}(k+1)}{2} \quad (8)$$

在区段 2,理论上可以采用区段 1 的步长更新策略。然而,在该区段,由于 $\frac{1+r_{\min}}{2}$ 通常为非常接近于 1 的值,所以步长更新可能很慢,会产生多次的潮流计算。因此,当系统运行或迭代计算至区段 2 时,转换为连续潮流计算通常更为有效。

在区段 3,由于 $\frac{1+r_{\min}}{2}$ 为小于 1 的值,所以利用式(7)达不到跟踪计算目的。因此,当系统运行或迭代计算至区段 3 时,应该转换为连续潮流计算。

由以上分析可知,区段 2 和区段 3 均采用连续潮流计算方法,所以可以合并为新的区段 2。因此,本文提出一个两阶段的混合连续潮流跟踪算法,将电压稳定边界的计算过程分成 2 个阶段:在阶段 1(区段 1),利用式(7)或式(8)中的步长更新策略,快速求出系统的近似电压稳定边界;在阶段 2(系统运行或迭代计算至区段 2 或区段 3),采用连续潮流方法,对电压稳定边界进行精确计算。在整个计算过程中,可以通过指标 $r_{\min}$ 识别系统是否已经接近于极限运行状态,以及是否需要阶段 1 和阶段 2 的更换。

3 计算步骤和流程

图 4 给出了本文方法的计算流程。由图 4 可以看出,利用本文方法实现电压稳定边界的快速计算,主要包括如下几个步骤。

a. 读取负荷阻抗矩阵和潮流计算的基础数据,并初始化参数 k 和 $L_{\text{am}}(k)$ 。

b. 执行潮流计算,求出各负荷节点的电压和电流相量。

c. 计算当前状态下的系统电压稳定指标 $r_{\min}$,这里所述当前状态用负荷增长因子 $L_{\text{am}}(k)$ 表征, $k=1$ 为初始状态, $L_{\text{am}}(1)=1$ 。

d. 若 $r_{\min} \leq 1+t_{\text{ol}}$,执行连续潮流计算,输出结果,计算结束;否则,令 $k=k+1$,利用式(7)更新 $L_{\text{am}}(k)$ 的值。

e. 计算 $L_{\text{am}}(k)$ 状态下的系统潮流;若潮流收敛,返回步骤 c;否则,令 $L_{\text{am-e}}=L_{\text{am}}(k)$ 和 $L_{\text{am-b}}=L_{\text{am}}(k-1)$ (为了编程方便,这里分别用 $L_{\text{am-b}}$ 和 $L_{\text{am-e}}$ 表示二分法的起点和终点),执行步骤 f。

f. 如果 $L_{\text{am-e}}-L_{\text{am-b}}<\varepsilon$ (ε 为判定迭代过程是否中止的判据,取 0.001 通常可满足要求),则 $L_{\text{am-b}}$ 为计算结果,计算结束;否则,令 $k=k+1$,利用式(8)所示的二分法更新系统负荷增长因子 $L_{\text{am}}(k)$ 。

g. 计算当前 $L_{\text{am}}(k)$ 状态下的系统潮流;如果潮流收敛,则执行步骤 h;否则,更新 $L_{\text{am-e}}=L_{\text{am}}(k)$,返回步骤 f。

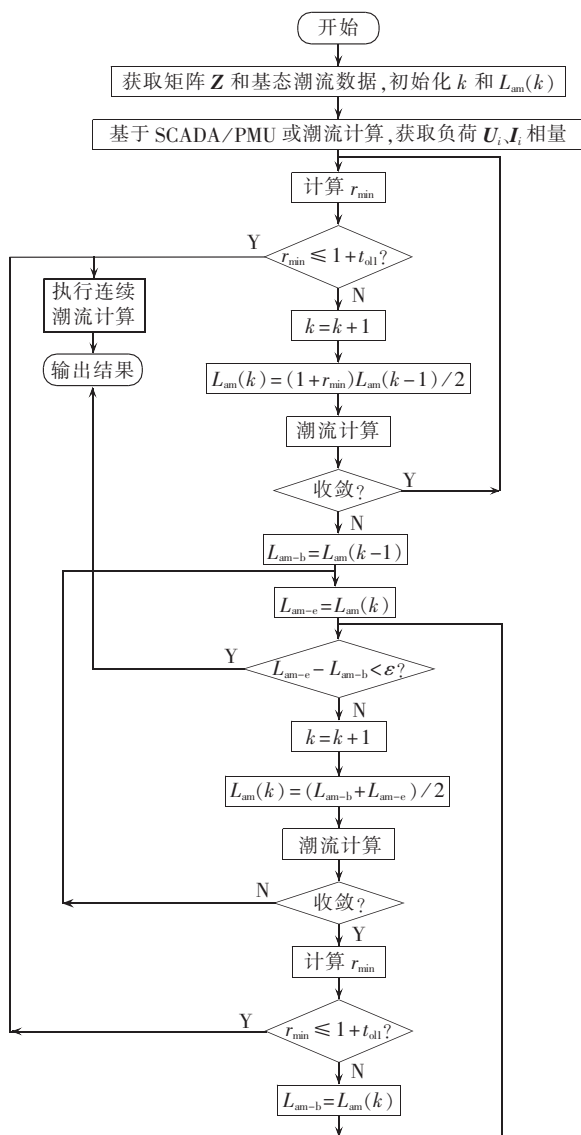


图 4 两阶段电压稳定边界计算流程图

Fig.4 Flowchart of two-stage voltage stability margin calculation

h. 计算指标 $r_{\min}$;如果 $r_{\min} \leq 1+t_{\text{ol}}$,执行连续潮流计算,输出结果,计算结束;否则,更新 $L_{\text{am-b}}=L_{\text{am}}(k)$,返回步骤 f。

原理上,在步骤 h 中,可以利用二分法循环迭代,直至系统的电压稳定边界。然而,在进行二分法迭代计算过程中,如果 $r_{\min}$ 小于事先指定的值(如 1.01)之后,执行连续潮流计算通常更有效。

4 算例分析

为了验证本文方法用于计算电压稳定边界的有效性,对 IEEE 30 节点系统、IEEE 118 节点系统、Polish 2 746 节点系统等各种规模的电力系统进行了仿真和分析。

这里主要对 Polish 2 746 节点系统的仿真结果进行介绍和分析,迭代计算过程和结果如图 5 和图

6 所示。在仿真计算中,各负荷节点的电流和电压数据通过基于 MATPOWER 的潮流计算程序获得^[26]。在图 5 中,实线(直线)代表利用小步长重复潮流法跟踪计算出来的电压稳定边界(系统最大负荷增长因子),虚线代表利用本文方法的迭代过程和计算结果。可以看出,本文方法只需要 5 次潮流计算,已经使系统状态足够接近于系统真实的极限运行状态。

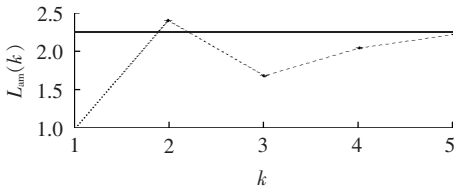


图 5 Polish 2746 节点系统电压稳定边界仿真结果
Fig.5 Simulative results of voltage stability margin for Polish 2746-bus system

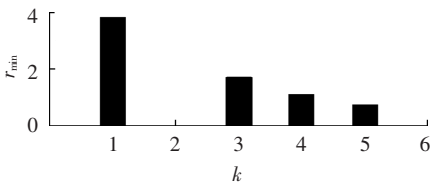


图 6 Polish 2746 节点系统每一步迭代计算时的 $r_{\min}$
Fig.6 $r_{\min}$ of each iteration calculation for Polish 2746-bus system

下面对图 5 和图 6 中的计算结果作量化分析,以使读者对本文方法有更直观的认识。

首先,计算系统基态潮流(迭代次数 $k=1$),得到指标 $r_{\min}=3.828$ 。由于此时的 $r_{\min}$ 远大于 1,所以需要更新 $k=2$,并利用式(7)计算 $L_{\text{am}}(2)=2.414$ 。

在 $L_{\text{am}}(2)=2.414$ 状态下,执行潮流计算,潮流不收敛,则知 $L_{\text{am}}(2)=2.414$ 已经使系统超出了极限运行状态,因此需要更新 $k=3$,并利用式(8)计算得到 $L_{\text{am}}(3)=1.707$ 。

在 $L_{\text{am}}(3)=1.707$ 状态下,执行潮流计算,潮流收敛,计算得到 $r_{\min}=1.728$ 。由于此时的指标 $r_{\min}$ 未接近于 1,所以需要更新 $k=4$,并利用式(8)计算得到 $L_{\text{am}}(4)=2.061$ 。

在 $L_{\text{am}}(4)=2.061$ 状态下,执行潮流计算,潮流收敛,计算得到 $r_{\min}=1.112$ 。由于此时的指标 $r_{\min}$ 仍未非常接近于 1,所以需要继续更新 $k=5$,并计算得到 $L_{\text{am}}(5)=2.237$ 。

在 $L_{\text{am}}(5)=2.237$ 状态下,执行潮流计算,潮流收敛,计算得到 $r_{\min}=0.758$ 。由于此时的指标 $r_{\min}$ 已经小于 1,表明系统已经接近于极限运行状态,此时调用连续潮流计算程序,即可快速得到系统的电压稳定边界。

事实上,在对计算精度要求不是很高的应用场景下, $L_{\text{am}}(5)=2.237$ 这一结果也能满足一些应用要

求。这种情况下,无需调用任何连续潮流计算程序,只需通过识别 $r_{\min}$ 是否小于 1,即可判断计算程序是否可以终止,并输出计算结果。

5 结论

本文提出了一种具有解析性质且能近似用于描述系统电压稳定性的特征指标,及基于这一指标的两阶段电压稳定边界评估方法。仿真结果表明,本文方法可以有效地实现功率步长控制,提高电压稳定边界的计算速度。当系统远离崩溃点时,利用所提出的电压稳定指标及二分法原理,确定重复潮流计算过程中的功率增长步长,快速求出系统的近似电压稳定边界;当系统运行或迭代计算至崩溃点附近时,所提出的电压稳定指标会接近于 1,表明此时需要转入阶段 2 的连续潮流计算。因此,本文方法不仅可以快速计算电压稳定边界,而且在计算过程中可以提供系统是否已经接近于极限运行状态等信息。

参考文献:

- [1] GAO B, MORISON K, KUNDUR P. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4):1529-1542.
- [2] 李兴源,王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4):1-4.
LI Xingyuan, WANG Xiuying. Fast voltage stability analysis methods based on static equivalence and singular value resolution [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4):1-4.
- [3] 吴浩,方鹤飞. 电压稳定临界点的实用直接法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5):18-24.
WU Hao, FANG Gefei. A practical direct method for voltage collapse point[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 1999, 11(5):18-24.
- [4] CANIZARES C, ALVARADO F. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1):1-8.
- [5] 程浩忠. 一种计算静态电压崩溃域度的简化实用方法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11):5-9.
CHENG Haozhong. A simplified and practical method for calculating static voltage collapse margins [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11):5-9.
- [6] VU K, BEGOVIC M, NOVOSEL D, et al. Use of local measurements to estimate voltage-stability margin[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3):1029-1034.
- [7] 汤涌,孙华东,易俊,等. 基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13):48-53.
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tracing algorithm for Thevenin equivalent parameters based on complete differential equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13):48-53.
- [8] 罗华伟,吴政球,戴庆华,等. 电网戴维南等值参数的快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1):35-39.
LUO Huawei, WU Zhengqiu, DAI Qinghua, et al. Fast computation of Thevenin equivalent parameters [J]. Proceedings of the CSEE,

- 2009,29(1):35-39.
- [9] 赵晋泉,杨友栋,高宗和. 基于局部相量量测的电压稳定评估方法评述[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):1-6.
- ZHAO Jinqun,YANG Youdong,GAO Zonghe. A review on online voltage stability monitoring indices and methods based on local phasor measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010,34(20):1-6.
- [10] 郑飞平,刘宝柱. 电压稳定临界参数的异步接替求取策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):98-102.
- ZHENG Feiping,LIU Baozhu. Determination of voltage stability critical parameters by asynchronous succession strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(3):98-102.
- [11] 随慧斌,赵建国,李可军,等. 考虑不均荷区域负荷增长的在线电压稳定评估[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):57-61.
- SUI Huibin,ZHAO Jianguo,LI Kejun,et al. On-line voltage stability assessment considering uneven growth of regional load [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(3):57-61.
- [12] 伍利,古婷婷,姚李孝. 基于改进连续潮流法的静态电压稳定分析[J]. 电网技术,2011,35(10):99-103.
- WU Li,GU Tingting,YAO Lixiao. Static voltage stability analysis based on improved continuation power flow[J]. Power System Technology,2011,35(10):99-103.
- [13] 刘焕志,李扬,陈霄. 基于连续潮流的输电网可用输电能力计算[J]. 电力自动化设备,2003,23(12):5-8.
- LIU Huanzhi,LI Yang,CHEN Xiao. Available transfer capability calculation based on continual power flow for transmission network [J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(12):5-8.
- [14] 张尧,张建设,袁世强. 求取静态电压稳定极限的改进连续潮流法[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(2):21-25.
- ZHANG Yao,ZHANG Jianshe,YUAN Shiqiang. Improved continuation power flow algorithm for obtaining the limit of static voltage stability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2005,17(2): 21-25.
- [15] 王刚,张雪敏,梅生伟. 基于近似连续潮流的在线电压稳定分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(11):6-11.
- WANG Gang,ZHANG Xuemin,MEI Shengwei. On-line voltage stability analysis based on approximate continuation power flow [J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(11):6-11.
- [16] 郭瑞鹏,韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法[J]. 电力系统自动化,1999,23(14):13-16.
- GUO Ruipeng,HAN Zhenxiang. An improved continuation power flow method for voltage stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(14):13-16.
- [17] 周双喜,冯治鸿,杨宁. 大型电力系统PV曲线的求取[J]. 电网技术,1996,20(8):4-8.
- ZHOU Shuangxi,FENG Zhihong,YANG Ning. Seeking PV curves in bulk power system[J]. Power System Technology,1996,20(8): 4-8.
- [18] 王成山,魏炜. 一种改进的步长控制连续性潮流计算方法[J]. 电工技术学报,2004,19(2):58-63.
- WANG Chengshan,WEI Wei. An improved continuation method with controlled step size[J]. Transactions of China Electro-technical Society,2004,19(2):58-63.
- [19] 胡泽春,王锡凡. 基于最优乘子潮流确定静态电压稳定临界点[J]. 电力系统自动化,2006,30(6):6-11.
- HU Zechun,WANG Xifan. Determination of static voltage collapse critical point based on load flow method with optimal multiplier [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(6):6-11.
- [20] 黄海伦,韦化,阳育德. 电压稳定约束的最优潮流研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(3):26-29.
- HUANG Hailun,WEI Hua,YANG Yude. Study on optimal power flow with voltage stability constraints[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(3):26-29.
- [21] 马冠雄,刘明波,王奇. 一种识别静态电压稳定分岔点的混合方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(24):17-20.
- MA Guanxiong,LIU Mingbo,WANG Qi. A hybrid method for identifying bifurcation points in steady-state voltage stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(24): 17-20.
- [22] 余贻鑫,李鹏,贾宏杰. 基于混合法的潮流可行域边界计算[J]. 电力系统自动化,2004,28(13):18-25.
- YU Yixin,LI Peng,JIA Hongjie. Power flow feasible region computation based on hybrid method[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(13):18-25.
- [23] 李增国,王锐,邢卫荣. 基于连续潮流和模态分析的电压稳定分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):81-84.
- LI Zengguo,WANG Rui,XING Weirong. Voltage stability analysis based on continuation power flow and modal analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):81-84.
- [24] 董晓明,梁军,韩学山,等. 连续潮流参数选择及步长控制的分析与改进[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):49-53.
- DONG Xiaoming,LIANG Jun,HAN Xueshan,et al. Analysis and improvement on parameter selection strategy and step-size controlling in continuation power flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):49-53.
- [25] LI W,CHEN T,XU W. On impedance matching and maximum power transfer[J]. Electric Power Systems Research,2010,80(9): 1082-1088.
- [26] ZIMMERMAN R,MURILLO-SÁNCHEZ C,THOMAS R. MATPOWER:steady-state operations,planning and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(1):12-19.

作者简介:

牟晓明(1980-),女,黑龙江勃利人,博士研究生,研究方向为电压稳定及无功优化控制(E-mail:xiaomingmou@yahoo.com.cn);

李志民(1963-),男,黑龙江穆棱人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:lizhimin@hit.edu.cn)。

基于故障支路电流序分量相位关系的选相元件

刘 凯^{1,2}, 索南加乐¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264001)

摘要: 故障支路电流序分量之间的相位关系包含了明确的故障相别信息, 但易受电流分布系数的影响。差电流中的负序分量的相位与故障支路中负序电流的相位相同; 在差电流中的正序分量中减去系统电源产生的正序电容电流, 修正后的正序差电流的相位与故障支路中的正序电流相同; 通过负序差电流和修正后的正序差电流之间的相位关系可以明确判断故障类型。该选相元件不受线路分布电容、线路补偿电抗器、电流分布系数的影响, 可在故障后长期使用, 灵敏度高。仿真实验数据验证了该选相元件可以正确地选出故障相别。

关键词: 继电保护; 选相; 故障电流; 正序分量; 负序分量; 分布电容

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.013

0 引言

分相电流差动保护原理简单、灵敏度高, 适用于系统振荡、非全相等各种复杂的运行状态和各种拓扑结构的电力网络, 具有天然的选相能力。由于具有上述优点, 线路光纤电流差动保护已广泛应用于电力系统中。

线路相电流差动保护本身有选相能力, 不需额外配备选相元件, 但相电流差动保护受线路分布电容电流的影响, 对于超高压长线路, 影响更大。为了消除线路分布电容电流对相电流差动保护的影响, 大量的文献研究了差动保护的电容电流补偿方法和不受分布电容影响的纵联保护新原理^[1-8]。提高灵敏度的另外一个方法是采用故障分量差动保护原理, 同属利用故障分量的零序电流差动保护和负序电流差动保护也在线路上得到了广泛应用^[9-10]。零序电

流差动保护和负序电流差动保护本身不具备选相能力, 需要配置选相元件, 以达到选相跳闸的目的。

选相是纵联方向保护、纵联距离保护和后备距离保护的必备功能, 因此选相元件一直是线路保护研究中的重点内容^[9-16]。文献[13]介绍了利用负序和零序分量之间的相位选相的方法, 这种选相方法一般需要和测量阻抗相结合, 计算较复杂, 且在系统振荡时会遇到困难。利用故障分量正序电流和负序电流之间的相位可以选出各种故障相别, 但由于使用故障分量, 仅能短时应用^[17]。目前常用的选相元件主要有突变量选相和序分量选相 2 种, 但其选相元件都受到系统中电流分布系数大小的影响^[15]。

线路差动保护可获得线路两端电气量, 因此有更多的信息可用于选择故障相别并具备更好的性能。需要指出的是, 在线路差动保护中使用零序和负序电流差动保护的目的是提高灵敏度, 零序和负序电流差动保护原理本身受线路分布电容电流的影响也较小, 用于二者的选相元件必须考虑分布电容电流的影响, 否则, 零序和负序差动保护的灵敏度会受其选相元件影响。

文献[9]提出了一种利用故障时三相差流幅值

收稿日期: 2011-09-18; 修回日期: 2012-12-12

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51037005); 国家自然科学基金资助项目(50877061, 506677051)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (51037005) and the National Natural Science Foundation of China(50877061, 506677051)

Two-stage power flow method for calculating voltage stability margin

MOU Xiaoming, LI Zhimin

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An analytical index is introduced to approximately describe the system voltage stability, based on which, a two-stage mixed power flow method is proposed to calculate the voltage stability margin. In stage one, the bisection method is applied to set the step size of power in the repeated power flow calculation for quickly determining the approximate voltage stability margin of system. In stage two, the continuous power flow technology is employed to accurately calculate the voltage stability margin. In both stages, the proposed index is used to identify if the system is close to the collapse point and to further determine when the stage should be alternated. Simulative results show that, the proposed method reduces the repeat times of power flow calculation and speeds up the calculation of voltage stability margin.

Key words: electric power systems; stability; continuous power flow; step-size control; two-stage algorithm