

基于分岔理论的负荷模型对交直流混联系统电压稳定性的影响

李文俏,王振树,李中强
(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要:为研究区域负荷模型对交直流混联系统电压稳定性的影响,以3机9节点交直流混联电力系统为例,建立考虑系统各元件动态特性的数学模型,采用分岔理论与局部参数化的延拓法相结合的方法对系统的平衡解流形进行追踪,并对影响系统稳定的鞍结分岔点、霍普夫分岔点进行探索和检测。在此基础上,针对不同负荷增长方式对电压稳定性的影响进行研究,重点分析比较国家电网各区域电网调度部门、规划部门所采用的负荷模型对电压稳定影响的异同。研究表明:以全网负荷同比增长方式增加负荷时系统静、动态负荷裕度最小,最不利于系统的稳定性;随着负荷模型中异步感应电动机比例的不断增加,分岔边界曲线前移,各类型分岔点出现时间缩短,系统的电压稳定裕度减小,电压稳定性将受到更大的威胁。

关键词:分岔理论;电压稳定性;交直流混联系统;负荷模型;平衡解流形

中图分类号:TM 743

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009036

0 引言

我国政治、经济、社会的持续发展,带动了用电需求的不断增长,电力行业的格局也发生了巨大的变化。自2007年起,我国开始大力推进高压直流输电电网架建设;目前,通过多个高压、特高压交、直流输电工程的建设,我国已形成全国性的交直流混联电力系统^[1]。具有“交直流并联运行、强直弱交、远距离大容量输电、多回直流集中馈入”主网架结构特征的大规模交直流混联电网,虽然在提升经济效益、保护生态环境方面起到了重要作用,但同时也给电力系统的电压稳定造成了很大威胁^[2]。电力负荷作为电力系统的重要组成部分,其数学模型对系统电压稳定性的计算与分析有很大影响,而随着直流输电容量的不断增加和受端用电负荷的快速增长,负荷特性对电力系统电压稳定性的影响也愈发重要^[3]。因此,对国家电网不同区域电网调度部门、规划部门所采用的各类负荷模型^[4]对交直流混联系统的电压稳定性的影响进行比较、分析具有重要意义。

电力系统本质上是一个强非线性动态系统^[5],电压稳定性性态的改变实质上是一个从稳态走向分岔的过程^[6],分岔理论作为研究非线性动态系统稳定性的有效工具,可以准确描述系统的动态过程^[7],有效弥补静态分析法的不足,因而在动态电压稳定性研究中得到广泛应用。文献[8]应用分岔理论研

究交直流输电系统电压稳定性,但没有考虑发电机及负荷的动态特性;文献[9]应用分岔理论研究励磁饱和环节对系统电压稳定性的影响,但采用的负荷成分较为单一,难以反映系统实际的运行状态;文献[10]对感应电动机负荷模型下的系统静态电压稳定进行分析,但所采用的负荷模型仅为感应电动机的稳态模型,没有计及感应电动机的动态过程,导致分析结果偏于保守、不够准确。本文综合考虑发电机及励磁系统、直流输电线路、负荷模型的动态特性,并对感应电动机负荷模型进行详细的数学建模,运用分岔理论研究国家电网各区域不同部门所采用的负荷模型对交直流混联系统电压稳定性的影响。

1 电压稳定的分岔分析方法

1.1 分岔理论

分岔理论研究的是在非线形系统中由于参数变化而导致系统定性性态发生突变的行为^[11]。电力系统是非线形系统,可由含参数的非线性微分代数方程组表示^[12]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda) \end{cases} \quad (1)$$

其中, \mathbf{x} 为系统的微分变量; \mathbf{y} 为系统的代数变量; λ 为系统的控制参数。微分方程 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda)$ 描述了同步电机、负荷等动态元件的动力学行为,代数方程 $0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda)$ 描述了网络功率潮流的平衡关系。

系统的平衡点应该满足下列方程:

$$\begin{cases} 0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \lambda_0) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \lambda_0) \end{cases} \quad (2)$$

其中, \mathbf{x}_0 为平衡点处系统的微分变量数值; \mathbf{y}_0 为平衡点处系统的代数变量数值; λ_0 为平衡点处系统的控

收稿日期:2020-05-28;修回日期:2020-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377099);山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MEE055)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377099) and the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2019MEE055)

制参数数值。

为研究系统的动态稳定性,将数学模型在平衡点处进行微分化变换:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = D_x f(x_0, y_0)dx + D_y f(x_0, y_0)dy \\ 0 = D_x g(x_0, y_0)dx + D_y g(x_0, y_0)dy \end{cases} \quad (3)$$

其中, $D_x f(x, y)$ 、 $D_x g(x, y)$ 分别表示函数 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 关于变量 x 的偏微分; $D_y f(x, y)$ 、 $D_y g(x, y)$ 分别表示函数 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 关于变量 y 的偏微分。

令 $A=D_x f(x_0, y_0)$ 、 $B=D_y f(x_0, y_0)$ 、 $C=D_x g(x_0, y_0)$ 、 $D=D_y g(x_0, y_0)$, 则:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = A_{sys} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 A_{sys} 为系统的雅可比矩阵,经过变换可得到描述系统动力学特性的微分状态方程为:

$$\dot{x} = (A - BD^{-1}C)x \quad (5)$$

令 $J_{aug} = A - BD^{-1}C$ 为系统的扩展雅可比矩阵,文献[7]证明了在矩阵 D 非奇异的情况下,扩展雅可比矩阵 J_{aug} 和雅可比矩阵 A_{sys} 具有相同的奇异性,因此,电力系统的稳定性问题完全可以由 J_{aug} 的特征值来确定,分析 J_{aug} 的特征值就能判断系统是否发生分岔以及分岔点的类型。

(1)鞍结分岔 SNB(Saddle Node Bifurcation):随着系统中控制参数的变化,系统的平衡解会由 2 个点逐步靠近而变为 1 个点,此时若系统受到任意小的扰动,平衡点附近的轨道拓扑结构将发生改变,即对应系统的 SNB 点^[13]。

(2)霍普夫分岔 HB(Hopf Bifurcation):随着系统中控制参数的变化,系统状态矩阵的一对共轭特征根会从虚轴的左侧运动到虚轴的右侧以及实部由负值变成正值,此时系统发生 HB^[14],平衡点和极限环相互影响致使电压失去稳定,HB 点是导致振荡的主要原因^[15]。

1.2 延拓法

延拓法是一种常用的追踪平衡解流形的的方法,它通过构造连续参数使得扩展潮流方程在临界点处不奇异,从而克服了潮流方程靠近稳定运行极限时不收敛的问题,确保得到完整的平衡解流形。应用延拓法求解系统的平衡解流形主要包括预测(预估)、校正和步长控制等基本要素。

本文采用局部参数化的参数化方法,预测环节采用切线法求取运行平衡点的近似值;校正环节采用牛顿迭代法对预测值进行校正,从而得到该平衡点处的精确值。为在保证准确性的基础上避免计算量过大,本文采用自动变步长的步长控制策略:首先取步长为常数值 0.05,在每次校正过程中对收敛时的迭代次数进行记录,如果某次迭代次数为上次迭代次数的 2 倍,则自动令步长变为 0.000 5,从而能够

保证快速准确地得到系统的精确解。采用延拓法对系统的平衡解流形进行追踪,并对各类型分岔点进行检测与搜索的流程图如图 1 所示。

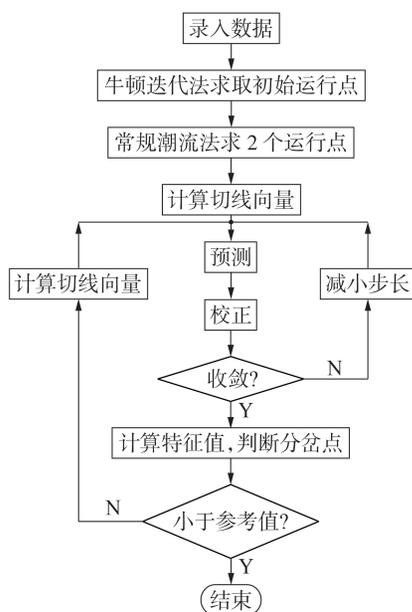


图 1 延拓法流程图

Fig.1 Flowchart of continuation method

2 系统模型

本文模型源自 WSCC 3 机 9 节点系统,将该系统节点 7、8 之间的交流输电线路用一条高压直流输电线路代替,其直流额定电压为 500 kV,额定电流为 2.4 kA,直流额定功率为 1 200 MW,整流器和逆变器分别连接于节点 7 和节点 8,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制,其他部分不作改变,则该系统成为一个交直流混联电力系统,如图 2 所示。其元件参数参考文献[16]。选取 G_1 为参考机,参数均采用标么值表示,功率基准值取 100 MV·A。同步发电机采用 IEEE 双轴四阶模型,其励磁系统采用简化一阶励磁系统。高压直流输电采用其准稳态模型。静态负荷模型采用 ZIP(Z 表示恒阻抗,I 表示

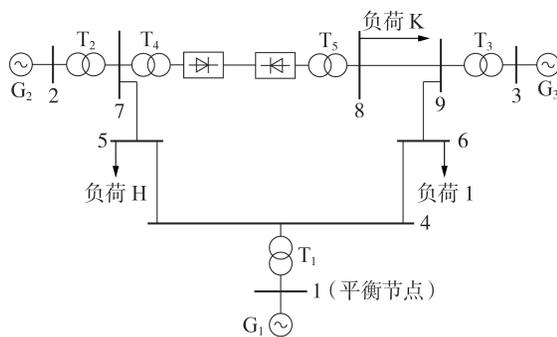


图 2 3 机 9 节点交直流混联系统接线图

Fig.2 Wiring diagram of 3-generator 9-bus AC / DC hybrid system

恒电流, P 表示恒功率)负荷模型, 可以表示为:

$$\begin{cases} P = P_0 [a_p (U/U_0)^2 + b_p (U/U_0) + c_p] \\ Q = Q_0 [a_q (U/U_0)^2 + b_q (U/U_0) + c_q] \end{cases} \quad (6)$$

其中, U 为实际电压; U_0 为参考电压, 一般取额定电压; P 、 Q 分别为端电压为 U 时负荷消耗的有功、无功功率; P_0 、 Q_0 分别为端电压为 U_0 时负荷消耗的有功、无功功率; a_p 、 b_p 、 c_p 与 a_q 、 b_q 、 c_q 分别表示恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷所消耗的有功、无功功率占总功率的百分比, 且有 $a_p + b_p + c_p = 1$ 、 $a_q + b_q + c_q = 1$ 。

动态感应电动机负荷模型采用三阶机电暂态模型, 即:

$$\begin{cases} T_j \frac{ds}{dt} = P_m - P_e \\ T'_{d0} \frac{dE'_x}{dt} = -E'_x - (x_1 - x'_1) I_y + \omega_0 T'_{d0} E'_y s \\ T'_{d0} \frac{dE'_y}{dt} = -E'_y + (x_1 - x'_1) I_x + \omega_0 T'_{d0} E'_x s \end{cases} \quad (7)$$

其中, E'_x 、 E'_y 分别为感应电动机的暂态电势 x 、 y 轴分量; I_x 、 I_y 分别为定子电流 x 、 y 轴分量; s 为转差率; ω_0 为同步转速, $\omega_0 = 2\pi f$, f 为频率; P_m 、 P_e 分别为感应电动机机械功率和电磁功率; T_j 、 T'_{d0} 分别为转子惯性时间常数、定子开路时间常数; x_1 、 x'_1 分别为稳态电抗、暂态电抗。

本文将负荷增长因子 λ 作为系统的控制参数, 系统的代数变量为 (V_j, θ_j) ($j = 1, 2, \dots, 9$), 微分变量为 $(\delta_i, \omega_i, E'_{qi}, E'_{di}, E_{tdi}, I_d, \alpha)$ ($i = 1, 2, 3$)。其中, V_j 、 θ_j 分别为节点 j 处的电压幅值及相角; δ_i 、 ω_i 分别为同步电机 G_i 的功角及电角速度; E'_{di} 、 E'_{qi} 、 E_{tdi} 分别为同步电机 G_i 的 d 、 q 轴暂态电势和 d 轴励磁电动势; I_d 、 α 分别为直流输电线路的直流电流、触发滞后角。

本文仿真分析是在 CPU 为 i5-3337U@1.8 GHz, 内存为 4 GB 的 PC 机上进行的, 编程及算例实现在 MATLAB R2016a 下进行。

3 负荷增长方式对交直流混联电力系统电压稳定性的影响

在实际电网运行过程中, 不同节点处或不同区域内的负荷增长方式不同。本文主要研究以下 3 种负荷增长方式对电压稳定性的影响。

方式 1: 负荷同比增长方式。负荷节点的有功和无功功率保持初始工作点时的功率因数和各节点间的比例不变同步增长。

方式 2: 单一节点负荷增长方式。仅增加 1 个节点的负荷功率, 其他节点处的负荷功率保持不变。

方式 3: 不同比例负荷增长方式。各负荷节点的负荷功率按照不同比例增长。

节点 5、6、8 处均接入恒功率负荷, 则各负荷节点处负荷功率可表示为:

$$\begin{cases} P_{Li} = P_{L0i} (1 + \lambda) \\ Q_{Li} = Q_{L0i} (1 + \lambda) \end{cases} \quad (8)$$

其中, P_{L0i} 、 Q_{L0i} 分别为额定电压下负荷节点 i 处负荷消耗的有功和无功功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为实际电压下负荷节点 i 处负荷消耗的有功和无功功率。

计算初值为系统潮流方程的平衡解, 对 3 种负荷增长方式下的系统平衡解流形进行追踪。图 3 依次为 3 种不同负荷增长方式下负荷节点 5、6、8 处的 PV 图, 表 1 为 3 种负荷增长方式下各分岔点处的负荷节点电压值 (图表中电压均为标幺值, 下同)。负荷增长方式 1—3 下的仿真计算耗时分别为 1252、1033、1367 s。

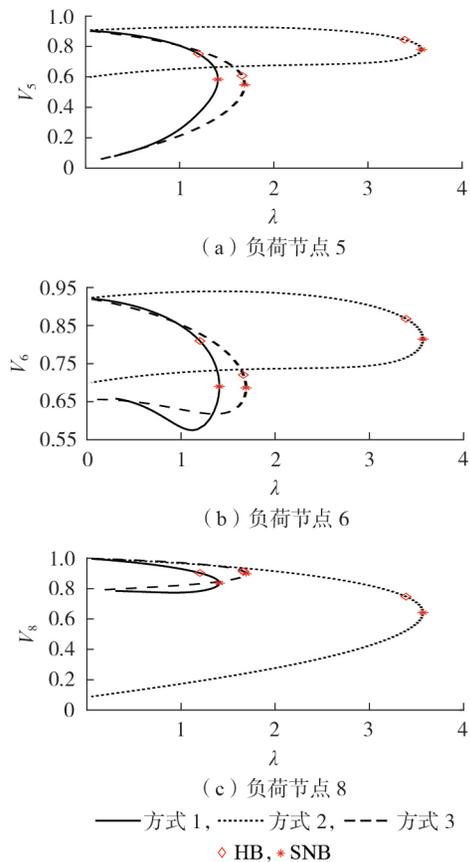


图3 3种负荷增长方式下负荷节点5、6、8处的PV图

Fig.3 PV curves at load node 5,6 and 8 under three load growth modes

表1 3种负荷增长方式下各分岔点处的负荷节点电压值

Table 1 Load node voltage values at each bifurcation point under three load growth modes

| 节点负荷增长比例 | | | 分岔类型 | V_5 | V_6 | V_8 | λ |
|----------|-----|-----|------|--------|--------|--------|-----------|
| 节点5 | 节点6 | 节点8 | | | | | |
| 1 | 1 | 1 | HB | 0.7623 | 0.8009 | 0.9505 | 1.3192 |
| | | | SNB | 0.6342 | 0.7027 | 0.9023 | 1.4626 |
| 0 | 0 | 1 | HB | 0.8603 | 0.8678 | 0.7473 | 3.3902 |
| | | | SNB | 0.8026 | 0.8142 | 0.6413 | 3.5693 |
| 1 | 1 | 0 | HB | 0.6472 | 0.7203 | 0.9144 | 1.6623 |
| | | | SNB | 0.5935 | 0.6862 | 0.8981 | 1.6903 |

由图 3 可以看出,随着负荷功率的不断增加,系统先后出现 HB 和 SNB,且不同的负荷增长方式对各节点处电压稳定性的影响十分明显。

(1)当系统中所有负荷节点的负荷功率同比增长时,各负荷节点处的电压幅值均有较大幅度的下降,且初始运行工况下所带负荷越大的节点,其电压幅值下降的幅度越大。

(2)当系统中仅固定其中 1 个节点的负荷功率增长时,该节点处的电压降落明显,且会对相邻节点的电压稳定性产生一定程度的影响,距离该负荷增长节点越近的节点,其电压降落幅度越大,但是对系统中其他节点电压幅值的变化影响很小。

(3)当系统中各负荷节点处负荷功率按照不同比例增长时,增长比例越大的节点,其电压降落速度也越快,临界稳定电压越小,更容易发生电压失稳。

通过比较可以看出,以全网负荷同比增长方式增加负荷时系统出现 HB、SNB 点的时间最早、电压稳定裕度最小,即当负荷增长方式为全网负荷同比增长时最不利于系统的稳定性。因此,在下面的研究中将采用全网负荷同比增长方式进行分析。

4 国家电网各区域采用的负荷模型对电压稳定性的影响

负荷作为电力系统的四大元件之一,其模型对电力系统稳定运行有很大影响。本文进行分析的负荷模型数据来自于文献[3],该文献对我国电力负荷模型的应用和研究现状进行了调查分析和总结,得到了各电网稳定计算中所采用的负荷模型。

在节点 8 处的负荷分别接入各区域电网规划部门、调度部门所采用的负荷模型,分别对不同负荷模型下系统的电压稳定性进行分析,采用各区域电网各部门不同负荷模型下系统的 PV 图如图 4 所示。

通过比较可见,异步电动机的接入会导致系统电压稳定裕度明显减小,临界失稳电压增大,系统发

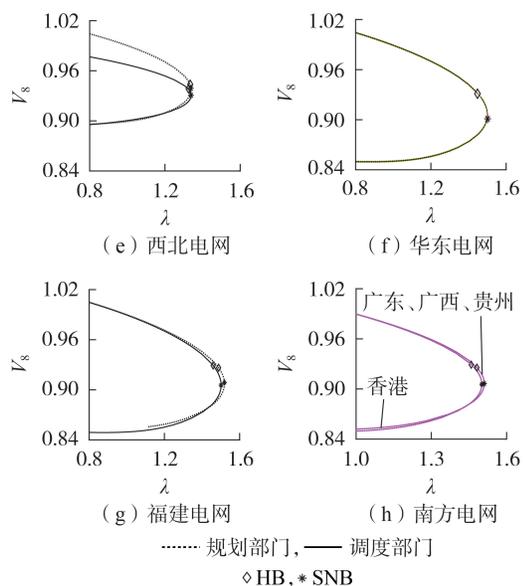


图 4 采用各区域电网的负荷模型下 3 机 9 节点交直流混联系统的 PV 图

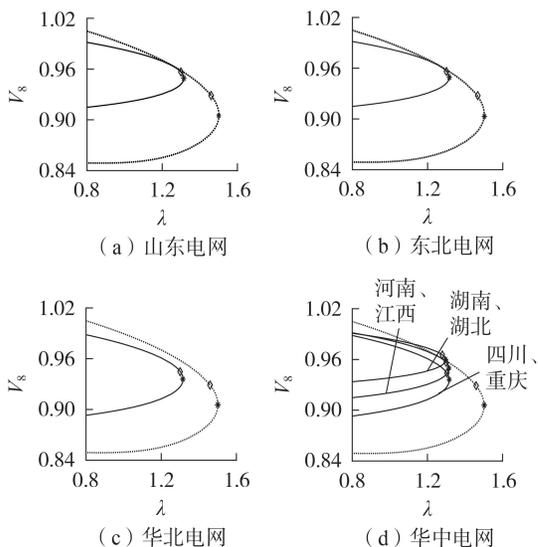
Fig.4 PV curves of 3-generator 9-bus AC/DC hybrid system with load models of each regional power grid

生动、静分岔的时间提前,不利于电力系统的稳定运行。因此,与调度部门相比,采用各区域规划部门的负荷模型所得到的电压稳定裕度、最大传输功率等计算结果更为保守。

由于实际电网进行稳定性分析所采用的负荷模型都是一定比例的 ZIP 负荷与一定比例的异步感应电动机负荷相并联的负荷,为便于比较不同负荷成分对电压稳定性影响的差异,本文将电网现有的负荷模型按照各负荷成分的比例进行分类、总结,得到不同比例负荷成分下系统分岔点处的控制参数值与节点 8 处电压幅值如表 2 所示(表中 M 表示感应电动机)。

表 2 不同比例负荷成分下系统分岔点处节点电压值
Table 2 Node voltage values at system bifurcation points with different proportions of load components

| 各负荷成分比例 / % | | | | 分岔点 | V_s | λ |
|-------------|----|----|----|-----|--------|-----------|
| Z | I | P | M | | | |
| 60 | 0 | 40 | 0 | SNB | 0.9087 | 1.5190 |
| | | | | HB | 0.9265 | 1.4881 |
| 40 | 0 | 60 | 0 | SNB | 0.9055 | 1.5013 |
| | | | | HB | 0.9292 | 1.4589 |
| 30 | 40 | 30 | 0 | SNB | 0.9064 | 1.5112 |
| | | | | HB | 0.9256 | 1.4815 |
| 20 | 0 | 60 | 20 | SNB | 0.9376 | 1.3383 |
| | | | | HB | 0.9291 | 1.4589 |
| 70 | 0 | 0 | 30 | SNB | 0.9302 | 1.3388 |
| | | | | HB | 0.9370 | 1.3272 |
| 60 | 0 | 0 | 40 | SNB | 0.9362 | 1.3163 |
| | | | | HB | 0.9439 | 1.3039 |
| 50 | 0 | 0 | 50 | SNB | 0.9497 | 1.3147 |
| | | | | HB | 0.9565 | 1.2999 |
| 35 | 0 | 0 | 65 | SNB | 0.9598 | 1.2971 |
| | | | | HB | 0.9655 | 1.2793 |



由表2可见,对于静态负荷而言,系统中恒阻抗负荷所占比例越大,电压稳定裕度、临界电压值及最大负荷功率越大;反之,恒功率负荷所占比例越大,电压稳定裕度、临界电压值以及最大负荷功率越小。与静态负荷相比,动态负荷对电压稳定性的影响更明显,系统中异步电动机所占比例越大,越不利于系统保持电压稳定运行。因此,在实际电网运行中,增加恒阻抗负荷的比例、减小异步感应电动机负荷的比例对避免由于负荷增加导致的电压失稳、提高系统的电压稳定性是十分必要的。

5 结论

本文采用分岔理论与延拓法相结合的方法,研究负荷增长方式以及国家电网各区域调度部门、规划部门所采用的负荷模型对交直流混联系统电压稳定性的影响。结果表明:以全网负荷同比增长方式增加负荷时系统出现HB点的时间最早、动态负荷裕度最小,且HB点与SNB点相距较远,即当负荷增长方式为全网负荷同比增长时最不利于系统的稳定性。在各类型的负荷模型中,动态负荷模型对电压稳定运行产生较大的负面影响,异步感应电动机负荷比例的增加会导致HB点和SNB点出现时间前移,电压稳定裕度减小,而恒阻抗负荷比例的增加会使得分岔边界曲线扩展,功率传输极限增加,对电压稳定运行起到一定的积极作用。仿真分析表明,提高恒阻抗负荷比例以及降低异步电动机负荷比例对提高电力系统电压稳定性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.
TANG Guangfu,PANG Hui,HE Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(7):1760-1771.
- [2] 杨欢欢,蔡泽祥,朱林,等. 直流系统无功动态特性及其对受端电网暂态电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):86-92.
YANG Huanhuan,CAI Zexiang,ZHU Lin,et al. Dynamic characteristic of HVDC reactive power and its influence on transient voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):86-92.
- [3] 李欣然,陈元新,蒋铁铮,等. 电压稳定研究中的负荷模型及其建模方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(6):9-13,21.
LI Xinran,CHEN Yuanxin,JIANG Tiezheng,et al. Power load model and its modeling method for voltage stability analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2000,12(6):9-13,21.
- [4] 张东霞,汤涌,张红斌,等. 负荷模型的应用与研究调查报告[J]. 电网技术,2007,31(4):16-23.
ZHANG Dongxia,TANG Yong,ZHANG Hongbin,et al. A survey paper of application and research of power system load model in power utilities[J]. Power System Technology,2007,31(4):16-23.
- [5] 张谦,郑惠萍,王金浩,等. 基于AQ节点的电力系统静态电压稳定裕度计算方法[J]. 电网技术,2019,43(2):714-721.

ZHANG Qian,ZHENG Huiping,WANG Jinhao,et al. A method for calculating static voltage stability margin of power system based on AQ bus[J]. Power System Technology,2019,43(2):714-721.

- [6] 路晓敏,陈磊,丁超杰,等. 水电直流孤岛系统的Hopf分岔和极限环[J]. 电网技术,2018,42(8):2544-2550.
LU Xiaomin,CHEN Lei,DING Chaojie,et al. Hopf bifurcation and limit cycle in islanded hydro-dominant sending systems [J]. Power System Technology,2018,42(8):2544-2550.
- [7] 彭志炜,胡国根,韩祯祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京:中国电力出版社,2005:68-70.
- [8] AIK D L H,ANDERSSON G. Nonlinear dynamics in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(4):1417-1426.
- [9] 李国庆,张浩,李江,等. 基于分岔理论研究励磁饱和和环节对系统电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):1-5,46.
LI Guoqing,ZHANG Hao,LI Jiang,et al. Influence of excitation saturation element on power system voltage stability based on bifurcation theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):1-5,46.
- [10] 任杰桢,鞠平,赵娟,等. 考虑电动机负荷的静态电压稳定分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):139-143.
REN Jiezheng,JU Ping,ZHAO Juan,et al. Static voltage stability analysis considering motor loads[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):139-143.
- [11] 薛禹胜,周海强,顾晓荣. 电力系统分岔与混沌研究述评[J]. 电力系统自动化,2002,26(16):9-15.
XUE Yusheng,ZHOU Haiqiang,GU Xiaorong. A review of bifurcation and chaos researches in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(16):9-15.
- [12] 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,2004:98-99.
- [13] 孙华东,汤涌,马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术,2006,30(17):31-35.
SUN Huadong,TANG Yong,MA Shiyong. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Technology,2006,30(17):31-35.
- [14] 李季,周雪松,马幼捷. 风电系统多参数霍普夫分岔分析[J]. 电网技术,2012,36(11):53-57.
LI Ji,ZHOU Xuesong,MA Youjie. Multi-parameter Hopf bifurcation analysis of wind power system[J]. Power System Technology,2012,36(11):53-57.
- [15] KATAOKA Y,SHINODA Y. Voltage stability limit of electric power systems with generator reactive power constraints considered[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(2):951-962.
- [16] SRIVASTAVA K N,SRIVASTAVA S C. Application of Hopf bifurcation theory for determining critical value of a generator control or load parameter[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,1995,17(5):347-354.

作者简介:



李文俏

李文俏(1993—),女,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统的运行与控制(**E-mail**:liwenqiao2004@163.com);

王振树(1963—),男,山东济宁人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统的运行与控制(**E-mail**:zhenshuwang@sdu.edu.cn);

李中强(1995—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统的运行与控制(**E-mail**:lizhongqiang95@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Influence of bifurcation theory based load model on voltage stability of AC / DC hybrid system

LI Wenqiao, WANG Zhenshu, LI Zhongqiang

(College of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to research the influence of regional load model on voltage stability of AC / DC hybrid power system, a mathematical model considering the dynamic characteristics of each component in the system is established by taking a 3-generator 9-bus AC / DC hybrid power system as an example. The system equilibrium solution manifold is tracked by combining bifurcation theory with continuation method of local parameterization, and the saddle node bifurcation and Hopf bifurcation which affect system stability are searched and detected. On this basis, the influence of different load growth modes on voltage stability is researched, and the differences of load models adopted by the dispatching departments and planning departments in each regional power grid of State Grid Corporation of China are emphatically analyzed and compared. The research shows that the system static and dynamic load margins are the smallest when the load is increased by the year-on-year growth of the whole grid load, which is most unfavorable to the system stability. With the increasing proportion of induction motor in the load model, the bifurcation boundary curve moves forward, the occurrence time of each kind of bifurcation point is shortened, the system voltage stability margin is reduced, and the voltage stability will be more threatened.

Key words: bifurcation theory; voltage stability; AC / DC hybrid system; load model; equilibrium solution manifold

(上接第 143 页 continued from page 143)

- [14] PEARSON K. Note on regression and inheritance in the case of two parents[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1895, 58(1): 240-242.
- [15] 曹红日, 米建宾, 于壮壮, 等. 负序电流保护的整定计算和配置方案探讨[J]. 华北电力技术, 2017(5): 20-26.
- CAO Hongri, MI Jianbin, DING Zhuangzhuang, et al. Discussion on setting calculation and configuration scheme of negative sequence current protection[J]. North China Electric Power, 2017(5): 20-26.

作者简介:



郑涛

郑涛(1975—), 男, 山东济南人, 教授, 博士研究生导师, 通信作者, 研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: zhengtao_sf@126.com);

于溯(1995—), 女, 黑龙江牡丹江人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 1182201309@ncepu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Novel scheme of fault phase selection for mixed-voltage four-circuit lines on same tower based on waveform correlation

ZHENG Tao¹, YU Su¹, WU Jianyun², LUO Meiling²

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: In order to solve the problem of complicated fault situation of mixed-voltage four-circuit lines on same tower and the problem that single-line fault phase selection method cannot be applied during cross-voltage fault, a new phase selection scheme based on waveform correlation is proposed. According to the change of the phase angle and amplitude of the fault phase current, the waveform autocorrelation coefficient and the improved autocorrelation coefficient are respectively proposed. To prevent the occurrence of mis-selection of phase in the strong magnetic coupling scene, the current sequence components of various faults are summarized, then the current sequence component-assisted phase selection is proposed to re-determine the possible mis-selection phase. Based on PSCAD / EMTDC, a large number of simulations are carried out for various faults of lines on same tower with mixed-voltage, and the simulative results verify the feasibility of the proposed fault phase selection scheme.

Key words: mixed-voltage four-circuit lines on same tower; relay protection; fault phase selection; waveform autocorrelation coefficient; improved autocorrelation coefficient; sequence components