

# 基于 Walve 负荷模型典型电力系统多参数分岔分析

刘韶峰,高金峰,李鹏

(郑州大学电气工程学院,河南 郑州 450002)

**摘要:**以通用非线性系统分岔分析软件 Auto97 为工具,对基于 Walve 综合负荷模型的典型 3 节点电力系统进行了多参数分岔分析。分析过程表明多参数分岔分析相对于单参数分析更能揭示系统参数对电力系统电压稳定性的影响情况。结果显示:选取较高的参考电压  $V_{ref}$  与励磁增益  $K_{AVR}$  不仅有利于提高功率传输极限、增加稳定裕度,而且有利于避免系统电压振荡失稳;同时表明  $V_{ref}$ 、 $K_{AVR}$  之间具有一定的互补特性,可通过  $V_{ref}$  和  $K_{AVR}$  的协调运用,避开 Hopf 分岔,保证系统安全运行。另外表明,大的励磁极限将更有利于电力系统电压动态稳定。

**关键词:**电力系统; 电压稳定; 鞍结分岔; Hopf 分岔

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)19-0013-05

## 0 引言

继 1977 年 7 月美国纽约大停电和 1982 年 12 月加拿大魁北克大停电以来,2003 年 8 月 14 日美国东北部和加拿大部分地区再次发生大面积停电事故,造成数千万人无电可用,更进一步引起人们对电力系统稳定的重视。与功角稳定相比,电压稳定问题近年来才得到了广泛的重视,取得了一定成果,但离完全理解电压失稳的机理还有距离。作为分析非线性系统结构稳定性的基本方法之一的分岔理论,近年来在电力系统电压稳定问题研究中得到了广泛应用。文献[1]探讨了单机无穷大系统在各种负荷模型下的分岔情况;文献[2]研究了计及发电机暂态电势和励磁系统详细模型的系统分岔情况;文献[3]给出了考虑 OLTC 和传输线动态的情况,发现系统存在有鞍结、Hopf、倍周期等多种分岔现象。但目前的研究结果大都局限于单参数分岔分析,文献[4]则以负荷有功  $P$  和无功  $Q$  作为参数进行了双参数分析,给出了单参数分析情况所没有发现的现象。这表明单参数分析很难揭示多个参数共同作用对电压稳定的影响。文献[5]使用恒功率负荷模型对 3 节点典型系统进行了简单多参数分岔分析,并做了将分岔分析应用于实际电力系统的尝试。本文在对文献[5]中系统进一步研究的基础上,采用更接近实际,能够描述大扰动下感应电动机动态行为的 Walve 综合负荷模型,以负荷功率、AVR 控制参考电压  $V_{ref}$ 、励磁增益  $K_{AVR}$  和励磁极限  $E_{fdlim}$  为分析参数,

研究了  $V_{ref}$ 、 $K_{AVR}$  以及励磁极限对系统电压稳定与运行情况的影响,得到了一些更接近实际的结论。

## 1 分岔理论简要回顾

分岔理论主要研究系统随参数改变引起的解结构和稳定性的定性变化过程。当动态系统参数变动经过某些临界值时,系统定性性态(如平衡状态、周期运动的数目和稳定性等)会发生突然变化,这种变化称为分岔,相应临界值对应的点为分岔点<sup>[4,6]</sup>。电力系统中常见的分岔现象有鞍结分岔(SNB)和 Hopf 分岔(HB)。在鞍结分岔点,系统的稳定平衡点和不稳定平衡点重合,雅克比矩阵出现一零特征值。在电压稳定分析中,当分岔参数取为负荷功率时,鞍结分岔点对应于  $P-V$ (或  $Q-V$ ) 曲线的拐点,即通常认为的网络可传输的最大传输功率。运行于鞍结分岔点邻域的系统如果分岔参数(负荷功率)进一步增加,系统平衡点消失,将导致系统电压崩溃。Hopf 分岔发生在系统雅克比矩阵的特征值有一对具有零实部的共轭复数出现时。随着参数变化,如果从稳定的平衡点分岔出一个稳定的极限环和一个不稳定的平衡点,则称为超临界 Hopf 分岔;如果从不稳定的平衡点分岔出一个稳定的平衡点和一个不稳定的极限环,则称为亚临界 Hopf 分岔。在电压稳定分析中,Hopf 分岔的出现,将导致系统出现振荡,进而系统维持周期振荡或振幅不断加大而最终导致失稳。

## 2 系统与负荷模型

系统结构如图 1 所示,为 2 机 3 节点系统,其中一台发电机看作无穷大母线( $V_{i2} = 1$ ),另一台机采

基金项目:河南省科技攻关项目(0124120302)

用发电机 5 阶实用模型,并加入一简单 AVR 控制且计及励磁极限。为使研究集中于励磁方面,忽略了调速器的动态。

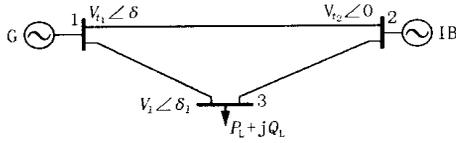


图 1 系统模型示意图

Fig. 1 Sketch map of system model

2. 1 发电机模型

$$\dot{H} = P_m - [E_q i_q + E_d i_d + (x_d - x_q) i_d i_q] - D \quad (1)$$

$$2H \dot{H} = P_m - [E_q i_q + E_d i_d + (x_d - x_q) i_d i_q] - D \quad (2)$$

$$d_0 \dot{E}_q = E_{fd} - E_q + [(x_d - x_d') / (x_d - x_d')] (E_q - E_q') \quad (3)$$

$$d_0 \dot{E}_q = -E_q + E_q + (x_d - x_d') i_d \quad (4)$$

$$q_0 \dot{E}_d = -E_d - (x_q - x_q') i_q \quad (5)$$

2. 2 励磁系统

$$T_{AVR} \dot{E}_{fd} = -E_{fd} + K_{AVR} (V_{ref} - V_{t1}) \quad (6)$$

式(1) ~ (6) 中各变量的意义和取值参见文献 [5]。

2. 3 负荷模型

负荷节点采用能够描述大扰动下感应电动机动态行为的 Walve 综合负荷与静态恒功率负荷并联模型。模型如下:

$$P_s = P_1 \quad (7)$$

$$Q_s = Q_1 \quad (8)$$

$$P_d = P_0 + k_{pw} \dot{V} + k_{pv} (V + TV) \quad (9)$$

$$Q_d = Q_0 + k_{qw} \dot{V} + k_{qv} V + k_{qv2} V^2 \quad (10)$$

其中:  $P_d + jQ_d$  为动态感应电动机负荷;  $P_0 + jQ_0$  为感应电动机的恒功率部分;  $k_{pw}, k_{qw}, k_{pv}, k_{qv}, k_{qv2}, T$  为负荷系数;  $P_s + jQ_s$  为与感应电动机并联的静态恒功率负荷。总负荷为  $P_L + jQ_L$ :

$$P_L = P_s + P_d = P_1 + P_0 + k_{pw} \dot{V} + k_{pv} (V + TV) \quad (11)$$

$$Q_L = Q_s + Q_d = Q_1 + Q_0 + k_{qw} \dot{V} + k_{qv} V + k_{qv2} V^2 \quad (12)$$

2. 4 系统综合模型

将系统各元件模型与网络方程联立可得到描述系统的综合模型,一般形式为:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (13)$$

其中:  $f$  定义了发电机、励磁系统和负荷的动态行

为;  $x = [E_q, E_q, E_d, E_{fd}, V_t, i]^T$  代表状态变量;  $u$  为控制参数向量。

3 系统多参数分岔分析结果

针对式(13)形式的典型 3 节点系统,以负荷功率、AVR 控制参考电压  $V_{ref}$ 、发电机励磁增益  $K_{AVR}$ 、发电机励磁极限  $E_{fdlim}$  为参数,进行分岔分析。负荷有功和无功按式(14),随  $k$  等比例变化:

$$\begin{cases} P_{L,k} = P_{L0}(1+k) \\ Q_{L,k} = Q_{L0}(1+k) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{L0} = P_1 + P_0, Q_{L0} = Q_1 + Q_0$  为负荷的静态部分,取值  $P_{L0}(\text{p.u.}) = 0.8, Q_{L0}(\text{p.u.}) = 0.6$ 。

值得指出的是,文献[5]给出的  $q$  轴次暂态开路时间常数  $q_0 = 0.9 \text{ s}$ ,为  $d$  轴次暂态开路时间常数  $d_0 = 0.03 \text{ s}$  的 30 倍。经查阅发电机参数,一般情况下,  $q_0$  不会超过  $d_0$  5 倍<sup>[8]</sup>,故本文将修正为  $q_0 = 0.09 \text{ s}$ ,其它参数不变。计算表明,  $q$  轴次暂态开路时间常数的大小不影响系统的负载能力及稳定裕度,仅对系统发生 Hopf 分岔的位置有一定影响,有关结果另文给出。

文中给出的均是使用非线性系统分岔分析软件 Auto97 得到的结果。由于 Auto97 三维作图功能方面的问题,将计算所得数值取出,利用 Matlab 绘制了图形。

3.1 参考电压  $V_{ref}$  对电压稳定的影响

根据  $V_t$  所代表的物理意义以及分岔理论中分岔图表示的关系,当  $V_{ref}, k$  变化使  $V_t$  处于稳定或不稳定平衡点状态时,对应于系统的电压稳定或不稳定;当发生 Hopf 分岔时,对应于系统电压开始出现振荡,进而维持周期振荡或振荡失稳。

为考察 AVR 控制参考电压  $V_{ref}$  对电压稳定的影响,图 2 中从右到左分别给出了  $V_{ref}$  取 1.10, 1.05, 1.00, 0.95, 0.93, 0.91, 0.89 时负荷节点电压  $V_t$  随负荷系数  $k$  变化而发生的分岔情况。图中的实线和虚线分别表示系统处于稳定、不稳定平衡点。为清晰,仅对  $V_{ref} = 0.89$  时的分岔曲线进行了标注。点 1、点 6 为该分岔曲线出发点,均为不稳定平衡点;点 2、点 3 与点 5 处的实心小方框表示该处发生了 Hopf 分岔;当然,根据分岔理论,鞍结分岔点则为图中所标示的每条曲线的拐点,如点 4。

首先从图 2 中可以看出,无论  $V_{ref}$  在 0.89 ~ 1.10 的范围内取何值,同一负荷水平下负荷节点电压  $V_t$  在发生鞍结分岔前均有 2 种可能的工作状态,

即以鞍结分岔点为分界的曲线上、下 2 个部分,上半部分是系统可能运行的状态,也是分析的重点。显然,若在曲线的上半部不出现实心小方框表示的 Hopf 分岔点,则表明系统在特定的参数下,可以稳定地输送功率,即鞍结分岔点对应的功率是系统所能传输的功率极限;若在曲线的上半部出现实心小方框表示的 Hopf 分岔点,则表明系统在特定的参数

下,在负荷功率达到鞍结分岔点对应的功率极限前,就已出现母线电压振荡甚至振荡失稳,这是系统运行所不允许的,此时该参数下,系统所对应的功率传输极限应为相应 Hopf 分岔点对应的负荷功率。基于此,AVR 控制参考电压  $V_{ref}$  对电压稳定的影响非常明显。

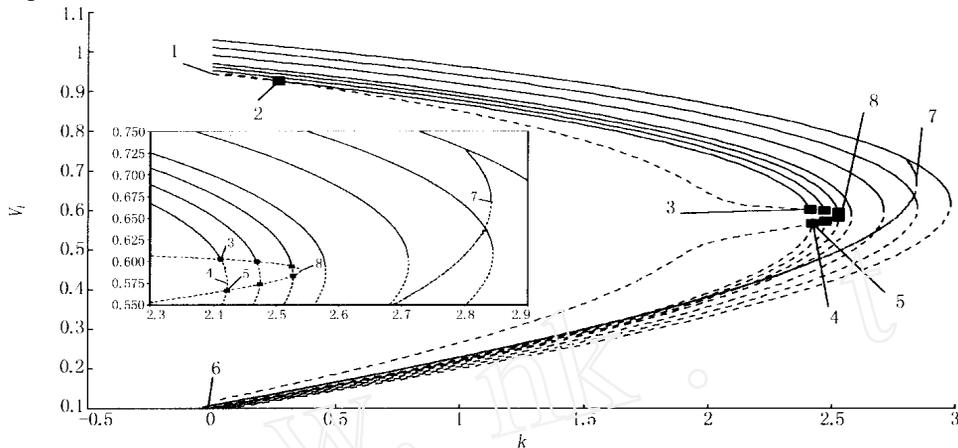


图 2 Valve 综合负荷模型下的分岔曲线和 Hopf 连续曲线

Fig. 2 Bifurcation curves and Hopf continuation curve for Valve aggregated load mode

当  $V_{ref}$  过低时,即使在较轻负荷下也会出现 Hopf 分岔,使系统处于不稳定状态。例如  $V_{ref}$  (p. u.) = 0.89 对应的分岔曲线,当  $k = 0.266\ 760\ 3$ ,即点 2 处就发生了 Hopf 分岔。这与文献[2]详细的单参数分岔分析中的结论相同。

当  $V_{ref}$  较低时,随负荷增加,系统首先出现 Hopf 分岔,母线电压开始振荡或振荡失稳;若负荷继续增加,则会发生鞍结分岔,导致系统电压单调失稳;随  $V_{ref}$  的增加,Hopf 分岔点离鞍结分岔点越来越近,直至 Hopf 分岔点不再出现。例如  $V_{ref}$  (p. u.) = 0.91 对应的分岔曲线,在  $k = 2.468\ 400$  时,出现 Hopf 分岔点; $k = 2.474\ 272$  时,发生鞍结分岔。若从分岔理论的角度看,每条曲线的下半部分有上半部分同样的情况出现,因实际系统不会在曲线的这一部分运行,不属于讨论的范围。

对  $V_{ref}$  取较高值情况,随负荷增加,不再出现 Hopf 分岔,系统主要以鞍结分岔导致电压单调失稳。例如  $V_{ref}$  (p. u.) = 1.10,对应于图 2 中最右边一条分岔曲线,仅当  $k = 2.979\ 887$  时,发生鞍结分岔。由图中 7 条分岔曲线的排列情况可以看出,随着  $V_{ref}$  的增大,鞍结分岔点不断向右平移,这表明  $V_{ref}$  增大可以提高网络的功率传输极限。进一步从高  $V_{ref}$  可以避免系统发生 Hopf 分岔的角度看,选取较

高的参考电压  $V_{ref}$ ,不仅有利于提高功率传输极限,而且有利于避免系统电压振荡失稳。

为考察系统随  $V_{ref}$  连续变化及不同负荷下可能产生 Hopf 分岔的情况,图 2 中还给出了 Hopf 分岔点随负荷变化系数  $k$  和参考电压  $V_{ref}$  变化的轨迹,如图中最左边的虚线所示。从图中可以看出,曲线随参数变化最终重合于点 8 (此时  $k = 2.539\ 177$ 、 $V_{ref} = 0.934\ 929\ 3$ )。这说明一定范围内 ( $V_{ref} = 0.934\ 929\ 3$ ,  $k < 2.539\ 177$ ),特定参数下,系统都可能会发生导致电压振荡失稳的 Hopf 分岔。同时 Hopf 分岔点随  $k$  改变的趋势也进一步解释了文献[7]中“轻载下系统更易发生 Hopf 分岔”的说法。

为进一步弄清参考电压  $V_{ref}$  变化对 Hopf 和鞍结分岔点的影响以及 Hopf 分岔、鞍结分岔对系统运行的影响,图 3 给出了 Hopf 和鞍结分岔点连续曲线在  $k - V_{ref}$  平面的投影。从图中可以看出,鞍结分岔点对应的负荷系数  $k$  与  $V_{ref}$  近似于成线性增长关系,这更清楚地表明了  $V_{ref}$  的增大可以提高功率传输极限。Hopf 连续曲线均位于鞍结分岔曲线左侧且最终重合于点 8,这表明一定运行参数下 Hopf 分岔先于鞍结分岔出现的事实。由 Hopf 分岔定理知道,在 Hopf 分岔点的参数邻域内必然存在周期轨,所以,在 Hopf 连续曲线所圈定的参数区域内,系统在发生

鞍结分岔之前,可能就已经出现了周期振荡等复杂的行为。可见,在参考电压  $V_{ref}$  较低时,鞍结分岔点对应的功率值已不是系统安全运行的负荷功率极限,单纯的鞍结分岔点已不能完全反映系统的实际负荷裕度。

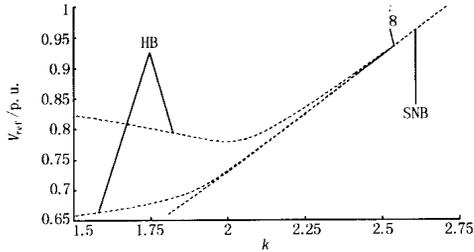


图3 Hopf 和 SNB 连续曲线

Fig.3 Hopf continuation curves and SNB continuation curve

### 3.2 励磁增益 $K_{AVR}$ 的影响

如前所述,虽然参考电压  $V_{ref}$  取大值可以使系统避开 Hopf 分岔点,增加功率传输极限,但在实际系统中的调节范围有限。因此,如何协调好发电机励磁系统的励磁增益与参考电压  $V_{ref}$  之间的关系,进而保证系统稳定运行意义重大。

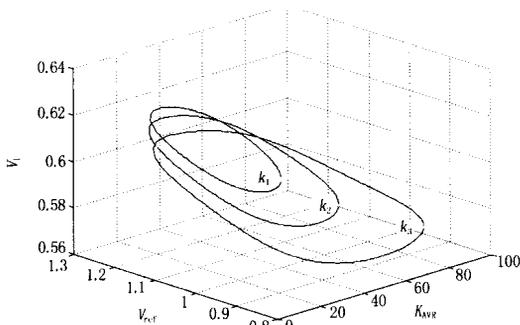


图4 不同负载下 Hopf 连续曲线

Fig.4 Hopf continuation curves under different loads

图4 在三维空间中给出了反映系统稳定性(振荡失稳)边界的 Hopf 分岔点连续曲线,如果负荷连续变化,则将构成一扁锥体。图5 是图4 曲线在  $V_{ref} - K_{AVR}$  平面的投影。3 条曲线分别代表不同的负荷水平 ( $k_1 = 2.609430$ 、 $k_2 = 2.524848$ 、 $k_3 = 2.411492$ )。锥体内,即图5 封闭曲线内部将具有复杂的状态,为不稳定区域。由不同负荷水平下的 Hopf 曲线可知,随  $V_{ref}$ 、 $K_{AVR}$  的增大,相应 Hopf 分岔点对应的功率传输极限也增大,这表明较大的励磁增益有利于避免系统电压振荡失稳。另外由图中同一负荷水平下,Hopf 分岔点随参数  $V_{ref}$ 、 $K_{AVR}$  变化构成一闭合环。这意味着  $V_{ref}$ 、 $K_{AVR}$  之间具有一定的互补特性。即可以通过选择合适的  $V_{ref}$  或  $K_{AVR}$ ,避开 Hopf

分岔,增加系统稳定裕度。所以,可以从图5 中,方便地得到如何协调励磁增益与参考电压  $V_{ref}$  之间关系的方案,为增加系统稳定裕度服务。

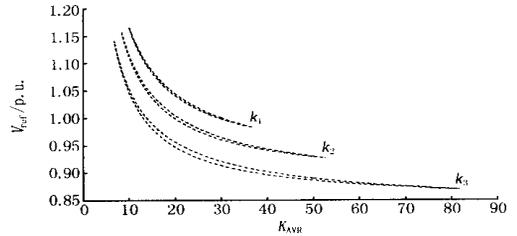


图5 不同负载下 Hopf 连续曲线

Fig.5 Hopf continuation curves under different loads

### 3.3 励磁极限 $E_{fdlim}$ 对系统运行的影响

前面的结果均是在励磁系统的励磁电压不受限制时得到的。但在实际运行中,由于转子电流具有上限,励磁电压不可能无限制地增加,而是有一极限值  $E_{fdlim}$ 。现探讨励磁极限  $E_{fdlim}$  对系统运行的影响。

图2 中标注有点7 且与每条曲线都相交的一段曲线为系统在励磁极限 ( $E_{fdlim}(p.u.) = 3$ ) 上运行时,负荷节点电压  $V_i$  随参数变化的情况,点7 为其鞍结分岔点。图2 中的局部放大图进一步展示了分岔曲线越过点7 后变为虚线(不稳定)的情况。图6 中的三维图形从多个侧面给出了励磁极限  $E_{fdlim}$  对系统运行情况的影响。图中实线、虚线的意义与图2 相同,此时没有考虑励磁极限作用(即  $E_{fdlim}(p.u.) =$  );当考虑励磁极限时,三角符( $\triangleleft$ )及十字符( $+$ )分别表示了系统在励磁极限 ( $E_{fdlim}(p.u.) = 3$ ) 上运行时处于的稳定与不稳定状态,方框( $\square$ )表示 Hopf 分岔点。显然,随着参考电压  $V_{ref}$  的增大,不仅避免了系统出现 Hopf 分岔点,而且提高了功率传输极限,这在前面已有详细阐述。但  $V_{ref}$  的提高,必然导致励磁电压的增大,如图中不同  $V_{ref}$  对应的分岔曲线所对应的  $E_{fd}$  范围。图中曲线对比表明,虽然  $V_{ref}$  的提高有利于系统稳定,但同时也使运行点的励磁电压更接近于励磁极限。过大的  $V_{ref}$  会使运行点励磁电压紧靠励磁极限,稳定裕度减小,恶化运行条件,此时励磁极限将成为系统稳定的关键因素。图7 给出的不同励磁极限下的分岔曲线也说明了这一点。因而当考虑励磁极限限制时,参考电压的选取并不是越大越好,而应在满足励磁极限要求下,选取尽可能大的值。

图7 显示了  $V_{ref}(p.u.) = 0.91$ ,其他参数保持不

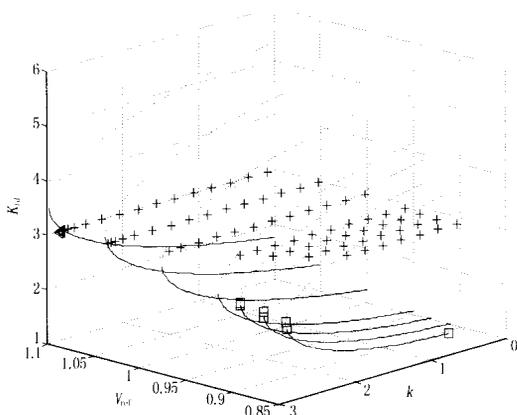
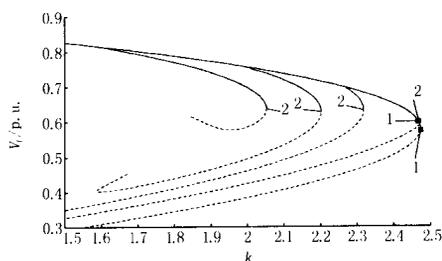


图6 Walve 综合负荷下的分岔曲线

Fig. 6 Bifurcation curves for Walve aggregated load mode

变时,系统在不同励磁极限下的分岔曲线,由左向右  $E_{fdim}(p.u) = 1.3, 1.5, 1.7, 2.16$ 。图中 1 为 Hopf 分岔点, 2 为鞍结分岔点。图 2 和图 7 表明当系统运行到励磁极限并在极限上运行时,母线电压随负荷增加将以更快的速度下降;此时系统主要以鞍结分岔导致母线电压单调失稳。从 5 条曲线排列可以看出,励磁极限的加入不但会使负荷稳定裕度降低,而且随励磁极限的减小,相应的鞍结分岔点对应的系统功率传输极限也将减小,使系统更容易失去稳定。

图7 不同  $E_{fdim}$  下的系统分岔曲线Fig. 7 Bifurcation curves with different  $E_{fdim}$  system

## 4 结论

本文采用能够描述大扰动下感应电动机动态行为 Walve 综合负荷模型,研究了负荷功率、参考电压  $V_{ref}$ 、励磁增益  $K_{AVR}$  和励磁极限  $E_{fdim}$  等多参数对系统电压稳定性的影响,分析结果表明:当不考虑励磁极限时,选取较高的  $V_{ref}$  与  $K_{AVR}$  不仅有利于提高功率传输极限、增加稳定裕度,而且有利于避免系统电压振荡失稳;考虑励磁极限时,参考电压的选取将受到一定限制,应在满足励磁极限要求下,选取尽可能大的值。同时表明  $V_{ref}$ 、 $K_{AVR}$  之间具有一定的互补特性,可通过  $V_{ref}$  和  $K_{AVR}$  的协调运用,避开 Hopf 分

岔,保证系统安全运行。另外表明,大的励磁极限将更有利于电力系统电压动态稳定。

## 参考文献:

- [1] Pal M A, Sauer P W, Lesieutre B C. Static and Dynamic Nonlinear Loads and Tructural Stability in Power Systems [J]. IEEE Trans, 1995, 83(11): 1562-1572.
- [2] Rajesh K G, Padiyar K R. Bifurcation of a Three node Power System with Detailed Models [J]. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(5): 375-393.
- [3] Rosehart D W, Caizares A C. Bifurcation Analysis of Various Power System Models [J]. Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21: 171-182.
- [4] 肖焱, 郭永基, 唐云, 等 (XIAO Kai, GUO Yongji, TANG Yun, et al). 典型电力系统模型的双参数分岔分析 (Two-parameter Bifurcation Analysis on a Typical Power System Model) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(6): 1-6.
- [5] Lerm A P, Canizares A C. Multi-parameter Bifurcation Analysis of Power Systems [A]. North American Power Symposium (NAPS). Cleveland (Ohio): 1998.
- [6] 陆启韶 (LU Qi-shao). 分岔与奇异性 (Bifurcation and Singularity) [M]. 上海: 上海科技教育出版社 (Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Education Press), 1995.
- [7] 韩文, 韩祯祥 (HAN Wen, HAN Zherr-xiang). 电力系统复杂模型的分叉与稳定 (Bifurcation and Stability of Complicated Model of Power System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(5): 46-52.
- [8] Anderson P M, Fouad A A. 电力系统的控制与稳定 (第一卷) (Power System Control and Stability, Part One) [M]. 电力系统的控制与稳定翻译组译 (Control and Stability of Power System Committee, Trans). 北京: 水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1979.

收稿日期: 2004-01-15; 修回日期: 2004-04-01

作者简介:

刘韶峰 (1977 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: Liusf @gs.zzu.edu.cn

高金峰 (1963 - ), 男, 博士, 教授, 长期从事非线性系统理论与控制方面的教学和科研工作;

李鹏 (1968 - ), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统谐波抑制与无功补偿。

(下转第 33 页 continued on page 33)

## Method analysis and comparison of power distribution systems composed of PV nodes with constant Jacobian matrix

HE Jiang-sheng, SUONAN Jia-le, LI Huai-qiang, SHAN Ya-zhou

(Electrical Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** With the increasing demand for real-time control of power distribution system, it is necessary to search for a new method which could not only form constant Jacobian coefficient matrix to accelerate iteration convergence rapidly, but also solve ill-conditioned nonlinear algebraic equation not to result in divergence as well. Based on Newton-Raphson method in polar form and derived from complex power equation, the Jacobian matrix of the proposed method has become constant by neglecting node load power which will bring less influence in iterating process and by linearizing the real and image of PV node voltage to magnitude. The applicability of constant Jacobian matrix has been demonstrated in detail and tested by numerical tests. The results show that the proposed method is very efficient and requires less computer memory observably. It does not need to decouple, and the ratio of resistance and reactance does not influence its convergence. The proposed method has excellent convergence characteristics and much better robustness. The results of the algorithm are analyzed in this paper. The proposed method can be used in meshed distribution and transmission networks as well.

**Key words:** power distribution system; load flow; constant Jacobian matrix

(上接第 12 页 continued from page 12)

作者简介:

唐剑东(1976 - ) ,男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中的应用; E-mail: tangjdw @vip. sina. com

熊信银(1945 - ) ,男,教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划及人工智能在电力系统中应用;

吴耀武(1963 - ) ,男,副教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划。

## Reactive power optimization of power system based on artificial fish swarm algorithm

TANG Jian-dong, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu, JIANG Xiu-jie

(School of Electric Power, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** An artificial fish swarm algorithm (AFSA) for reactive power optimization of power system and a model based on AFSA are presented for the first time in this paper. Compared with the genetic algorithm (GA) and the modified Tabu search algorithm (MTSA), the reactive power optimization result of IEEE 6, IEEE 14 node system and a real region power system by AFSA shows that AFSA has a strong robustness and good global optimality. It also shows that AFSA is a successful and feasible approach for reactive power optimization.

**Key words:** artificial fish swarm algorithm; power system; reactive power optimization; random search

(上接第 17 页 continued from page 17)

## Multi-parameter bifurcation analysis of a typical power system with the Walve aggregated load model

LIU Shao-feng, GAO Jir-feng, LI Peng

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** This paper performs a multi-parameter bifurcation analysis of a typical power system with the Walve aggregated load model using a general nonlinear analysis software Auto97. The results indicate that the method by multi-parameter bifurcation analysis is superior to that by single-parameter analysis in discovering the influences of system parameters on voltage stability of power system. The results imply that a higher reference voltage ( $V_{ref}$ ) and a bigger exciter gain ( $K_{AVR}$ ) can not only increase the power transmission limit of the system, but also decrease the possibility of voltage collapse caused by system voltage oscillating. The analysis also indicates that there is a complementary relation between  $V_{ref}$  and  $K_{AVR}$ , thus adjusting  $K_{AVR}$  and  $V_{ref}$  properly can avoid Hopf bifurcation and maintain the system's security operation, and that a higher limit of the excitation conduces to sustaining system voltage dynamic stability.

**Key words:** power systems; voltage stability; saddle-node bifurcation; Hopf bifurcation