

负荷配比对静态电压稳定性的影响

李宝国,鲁宝春,闫钊,巴金祥

(辽宁工学院信息科学与工程系,辽宁 锦州 121001)

摘要: 首先对基于 $U-I$ 特性的电压稳定判据作简单回顾,讨论节点负荷比对电压稳定性的影响;之后进一步提出更具有实用价值的节点电压稳定性判别方法及节点电压稳定视在功率临界值的计算方法,为快速在线判断电压稳定性提供了一种新方法。

关键词: 电压稳定; $U-I$ 特性; 负荷配比

中图分类号: TM761+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)06-0010-04

1 前言

八十年代以来,国外多次发生的大电力系统电压失稳而导致系统崩溃事故,使电力系统的电压稳定性问题受到广泛的关注和重视^[1,2]。电力系统是一个具有高度非线性的复杂系统,其潮流方程有无穷多解,目前,在数学领域中还没有关于非线性代数方程解的个数的理论,因而潮流多解并未得到足够的验证和实际使用,至今,电压失稳和崩溃的机理始终未能探明^[3]。本文在对供应侧和负荷侧 $V-I$ 特性与节点电压稳定关系分析的基础上,讨论了节点负荷比对电压稳定性的影响,提出了更具有实用价值的节点电压稳定性判别方法及视在功率临界值的计算方法,为快速在线判断电压稳定性提供了一种新方法。

2 负荷 $U-I$ 静特性

所谓 $U-I$ 静特性,是指静态时,节点电流向量的模值与电压向量模值之间的关系特性,其曲线称为 $U-I$ 静特性曲线。

在电压稳定分析计算中,负荷的静态模型可以认为由以下几种模型按不同的比例组成^[4]:

(1) 恒阻抗负荷模型

该模型的 $U-I$ 静特性可以用图 1 的曲线 1 表示,近似为一条过原点的直线,其阻抗模值基本不随电压而变。

(2) 恒功率负荷模型

该模型的 $U-I$ 静特性可以用图 1 的曲线 2 表示,近似为一条双曲线,其电压与电流乘积的模值不随电压而变。

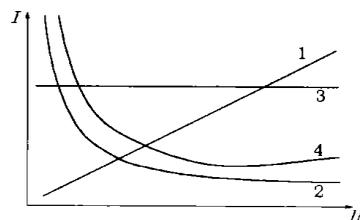


图 1 典型负荷特性

(3) 恒电流负荷模型

该模型的 $U-I$ 静特性可以用图 1 的曲线 3 表示,近似为一条与 U 轴平行的直线,其电流模值基本不随电压而变。

其中恒电流负荷模型在相当宽的电压范围内可以由前两种负荷模型按适当的配比来替代^[4]。因此在本文中把综合负荷表述为恒阻抗与恒功率负荷模型的组合,如下式:

$$P = (U^2 +) P_0 \quad (1)$$

其中 P_0 为 $U=1$ 时的有功功率。根据负荷的实际情况适当取值,且满足 $+ = 1$ 。其 $U-I$ 静特性可以用图 1 中的曲线 4 表示。本文的主要目的之一就是研究与对电压稳定性的影响。

3 基于 $U-I$ 特性的电压稳定判据的回顾

对于任意复杂的系统,为了从机理上研究节点电压稳定与节点 $U-I$ 特性之间的内在联系,在关键节点 B 处对系统进行戴维南等效^[5,6],如图 2 所示。

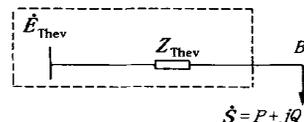


图 2 节点 B 戴维南等效

图中 \dot{E}_{Thev} 为戴维南等效电势向量, Z_{Thev} 戴维南等效复阻抗, \dot{S} 为节点 B 的复功率。则负荷侧 $U-I$ 特性为:

基金项目: 辽宁省自然科学基金(001081); 辽宁省教委基金(990821100)

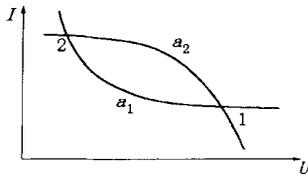
$$I = S/U \tag{2}$$

供应侧的 $U-I$ 特性为:

$$I^2 = \frac{E_{Thev}^2 - U^2 - 2SZ_{Thev}\cos(\theta_{Thev} - \theta_L)}{Z_{Thev}^2} \tag{3}$$

曲线如图 3 所示,其交点即为系统的平衡点。

图中曲线有两个交点 1 和 2,是否稳定取决于该点处供应侧和负荷侧 $U-I$ 特性曲线的斜率的比较,负荷侧 I 对 U 的斜率为 K_L ,而供应侧 I 对 U 的斜率为 K_G 。则节点电压稳定判据为:



a_1 : 负荷侧 $U-I$ 静特性;
 a_2 : 供应侧 $U-I$ 静特性

图 3 系统静态工作点

当 $K_L > K_G$ 时,该节点电压是稳定的。

当 $K_L < K_G$ 时,该节点电压是不稳定的。

当 $K_L = K_G$ 时,该节点处于临界稳定状态。

图中曲线交点 1、2 分别对应着高、低两个电压解。在高压解 1 处,由于 $K_{L1} > K_{G1}$,所以交点 1 是稳定的平衡点。而在低压解 2 处, $K_{L2} < K_{G2}$,所以交点 2 是不稳定的平衡点。

4 电压稳定判据的分析

为了研究问题的简化,假设负荷的功率因数恒定,则(1)式的负荷模型所对应的负荷侧 $U-I$ 特性为:

$$I = \frac{(U^2 + S_0)}{U} \tag{4}$$

供应侧 $U-I$ 特性为:

$$I^2 = \frac{E_{Thev}^2 - U^2 - 2(U^2 + S_0)Z_{Thev}\cos(\theta_{Thev} - \theta_L)}{Z_{Thev}^2} \tag{5}$$

其中 S_0 为 $U = 1$ 时的负荷视在功率, θ_L 为负荷的功率因数角, θ_{Thev} 为戴维南等值阻抗角。

在交点处,负荷侧特性曲线的斜率为:

$$K_L = \left[-\frac{S_0}{U^2} \right] \tag{6}$$

供应侧特性曲线的斜率为:

$$K_G = -\frac{[1 + 2 \frac{S_0 Z_{Thev}\cos(\theta_{Thev} - \theta_L)}{Z_{Thev}^2 S_0 (U^2 + S_0)}] U^2}{Z_{Thev}^2 S_0 (U^2 + S_0)} \tag{7}$$

将式(6)、式(7)代入电压稳定判据 $K_L > K_G$,并整理,得电压稳定判据:

$$Y(X) = (U^2 - S_0^2) X^2 + 2U^2 \cos(\theta_{Thev} - \theta_L) X + U^4 > 0 \tag{8}$$

其中 $X = S_0 Z_{Thev}$, $\theta = \theta_{Thev} - \theta_L$, $Y(X)$ 为 X 的二次函数,其判别式为:

$$\Delta = -4U^4 (U^2 \sin^2 \theta - S_0^2) \tag{9}$$

下面对(8)式进行讨论:

当 $U^2 - S_0^2 > 0$ 时, $Y(X)$ 为一开口向上的抛物线。

当 $\Delta < 0$ 时,

$$U > \sqrt{\frac{S_0}{|\sin \theta|}} \tag{10}$$

此时 $Y(X) = 0$ 无解,即 $Y(X)$ 恒大于零。

当 $\Delta = 0$ 时,可得下式:

$$U = \sqrt{\frac{S_0}{|\sin \theta|}} \tag{11}$$

此时 $Y(X) = 0$ 有两个解(等号时有一个解):

$$X = \frac{-U^2 (U^2 \cos \theta \pm \sqrt{U^2 - S_0^2} U^2 \sin^2 \theta)}{2(U^2 - S_0^2)} \tag{12}$$

这两个解均为负值,故当 $X \geq 0$ 时, $Y(X) > 0$ 恒成立。

当 $U^2 - S_0^2 = 0$ 时, $Y(X)$ 为一直线。 $Y(X) = 0$ 的解为负值,故当 $X \geq 0$ 时, $Y(X) > 0$ 恒成立。

由式(10)、(11)可见,当 $U > \sqrt{\frac{S_0}{|\sin \theta|}}$ 时, $Y(X) > 0$ 恒成立。故该运行点必定稳定。

当 $U^2 - S_0^2 < 0$ 时, $Y(X)$ 为一开口向下的抛物线,且 $\Delta > 0$, X 有两个解,舍去负数解,有正解为:

$$X = \frac{U^2 (U^2 \cos \theta + \sqrt{U^2 - S_0^2} U^2 \sin^2 \theta)}{2(U^2 - S_0^2)} \tag{13}$$

所以,当 $U < \sqrt{\frac{S_0}{|\sin \theta|}}$ 时,该运行点可能会发生电压失稳定问题。

令: $(U^2 + S_0) X_0 = A$

则:

$$A = \frac{U^2 (U^2 \cos \theta + \sqrt{U^2 - S_0^2} U^2 \sin^2 \theta)}{U^2 - S_0^2} \tag{14}$$

可得电压稳定判据如下:

当 $SZ_{Thev} < A$ 时,该运行点是稳定的。我们定义 A 与 SZ_{Thev} 之差为 A 裕度。

当 $SZ_{Thev} > A$ 时,该运行点是不稳定的。

当 $SZ_{Thev} = A$ 时,该运行点处于临界状态。

其中 $S = S_0 (U^2 + S_0)$,即节点实际功率。

5 与 对电压稳定性的影响

由于 $\alpha + \beta = 1$, 故只考察 α 对稳定性的影响。

当 $\alpha = 0$ 时, $\sqrt{1 - \beta} + \beta$, 必有 $U < \sqrt{1 - \beta}$, 故存在电压稳定问题。此时 $A = U^2$, 电压稳定的条件为 $SZ_{Thev} < U^2$ 。此时属于恒功率负荷, 正好和阻抗模电压稳定性判别法相一致。

当 $\alpha = 1$ 时, $\sqrt{1 - \beta} = 0$, 必有 $U > \sqrt{1 - \beta}$ 时, 该运行点必定稳定。此时属于恒阻抗负荷, 不存在电压稳定问题。

当 $0 < \alpha < 1$ 时, 节点在某一电压下运行时, 与 A 的关系曲线如图4所示。由图可见, 随着 α 由0增加到1, A 逐渐增大, 即系统的稳定性逐渐增强。

另外, 值得注意的是: A 的大小不仅与 α 有关, 而且与节点的实际运行电压有关, 即节点运行电压越高, 则 A 值越大, 系统的稳定性越强。尽管 A 与 Z_{Thev} 无关, 但 Z_{Thev} 也直接影响电压稳定性, Z_{Thev} 越大电压稳定性越差。由临界稳定条件 $SZ_{Thev} = A$ 可得临界稳定的视在功率:

$$S^{cr} = A / Z_{Thev} \tag{15}$$

在某一电压下某节点的实际功率只要小于临界功率, 那么该节点必定是稳定的。图4绘出了某一电压下临界功率与 α 之间的关系曲线。定义临界功率与实际功率之差为功率裕度。

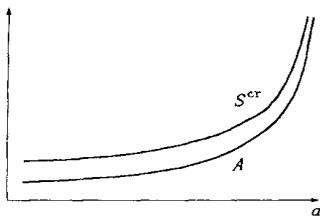


图4 A(S^{cr}) - 曲线

6 算例

以 IEEE30 节点系统的第 26 节点为例进行验证。运行负荷为 $P = 0.035, Q = 0.023$, 从该节点处对系统进行戴维南等值: $E_{Thev} = 1.042, Z_{Thev} = 0.804, \theta_{Thev} = 62.35^\circ$, 此时 $\theta_L = 33.31^\circ$ 。

假设取综合负荷模型 $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$ 。代入式(4)和式(5), 解得电压的两个解为 $U_1 = 1.012, U_2 = 0.016$ 。在高压解处, $U_1 > \sqrt{1 - \beta} = 1$, 所以该平衡点是

稳定的。而在低压解处, $U_2 < \sqrt{1 - \beta} = 1$, 故在该平衡点处存在电压稳定问题, 又由于存在 $SZ_{Thev} = 0.0168 > A = 0.0003$, 所以该点是不稳定的平衡点。

仍以该节点为例, 但改变运行点负荷 $P = 0.29, Q = 0.19$ 。从该节点处对系统重新进行戴维南等值: $E_{Thev} = 1.043, Z_{Thev} = 0.8035, \theta_{Thev} = 61.79^\circ$, 此时 $\theta_L = 33.23^\circ$ 。

假设取综合负荷模型 $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$ 。代入式(4)和式(5), 解得电压的两个解为 $U_1 = 0.639, U_2 = 0.263$ 。在两个平衡点处均有 $U < \sqrt{1 - \beta} = 1$ 存在, 故

两点均存在电压稳定性问题。在高压解处, $SZ_{Thev} = 0.279 < A = 0.903$, 此时的实际功率 $S_1 = 0.347$, 临界功率 $S_1^{cr} = 1.123$ 。所以该点是稳定的, 其 A 裕度为 0.624 , 功率裕度为 0.776 。在低压解处, $SZ_{Thev} = 0.212 > A = 0.078$, 此时的实际功率 $S_2 = 0.263$, 临界功率 $S_2^{cr} = 0.097$ 。所以该点是不稳定的平衡点。

假设取综合负荷模型 $\alpha = 0, \beta = 1$ 。解得电压的两个解 $U_1 = 0.639, U_2 = 0.436$, 在两个平衡点处均有 $U < \sqrt{1 - \beta} = 1$, 故均存在电压稳定问题。在高压解处,

$SZ_{Thev} = 0.279 < A = 0.409$, 实际功率 $S_1 = 0.347$, 临界功率 $S_1^{cr} = 0.508$ 。所以该点是稳定的, 其 A 裕度为 0.130 , 功率裕度为 0.161 。在低压解处, $SZ_{Thev} = 0.279 > A = 0.190$, 此时的实际功率 $S_2 = 0.347$, 临界功率 $S_2^{cr} = 0.236$ 。所以该点是不稳定的平衡点。

由算例可见, 负荷功率越大, 系统稳定性越差; 负荷功率相同, 且都是稳定的运行点, 但由于负荷配比的不同而具有不同的稳定程度, 即 α 越大, 系统稳定性越好。

7 结论

本文通过对系统 $U-I$ 特性的电压稳定性判据分析, 得出了负荷配比与电压稳定性之间的关系, 进而提出了当节点电压满足关系式 $U > \sqrt{1 - \beta}$ 时, 该节点不存在电压稳定问题。只有当节点电压不满足 $U > \sqrt{1 - \beta}$ 时, 该节点才存在电压稳定问题, 且 α 越大, U 越大, 稳定性越强。利用公式(15)可求得某电压下的临界视在功率 S^{cr} , 当节点实际功率小于 S^{cr} 时, 系统是稳定的; 当节点实际功率大于 (下转第 16 页)

曲线。

由图 2 和图 3 可见,在模糊变结构控制下的系统的阻尼特性和 SVC 所在处的电压特性都优于常规控制下的系统响应特性。SVC 所在处的电压维持得较好;同时在附加励磁模糊变结构控制器的作用下,系统的稳定性有了明显的改善。

4 结论

本文利用模糊变结构控制方法设计出了 SVC 和发电机附加励磁的综合控制器。该控制器能够同时考虑 SVC 安装点电压控制和发电机功角稳定两个目标,而且实现了 SVC 控制和附加励磁控制的解耦,使所设计的控制器均可利用当地信号实施控制策略。仿真计算表明:SVC 和发电机附加励磁模糊变结构综合控制器能够改善系统暂态过程中的阻尼特性,同时可以最大限度地维持 SVC 安装点的电压

恒定。

参考文献:

- [1] 刘瑞叶,于浩,陈学允.汽轮发电机组的模糊变结构附加励磁控制[J].哈尔滨工业大学学报,2000,32(4):130-132.
- [2] 卢强,孙元章.电力系统非线性控制(第二版)[M].科学出版社,1995:155-215.
- [3] Hingorani N G. Flexible AC Transmission[J]. IEEE Spectrum, 1993,4:40-45.
- [4] 李士勇.模糊控制神经控制和智能控制论[M].哈尔滨工业大学出版社,1996:226-232.

收稿日期: 2001-07-11; 改回日期: 2002-04-03

作者简介: 刘瑞叶(1963-),女,博士,副教授,主要从事电力系统稳定分析与控制的研究; 刘宝柱(1974-),男,硕士研究生,从事电力系统稳定分析与控制的研究。

Fuzzy Variable Structure Coordinated Control of SVC and Additional Excitation

LIU Ruir-ye, LIU Bao-zhu

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A coordinated controller of SVC and additional excitation is designed in this paper based on the theory of fuzzy control and the theory of nonlinear variable structure control. It can consider both the stability of generator angle and the voltage control at the location of SVC. Control objective is easily carried out with the local measurements. Analysis and simulations show the effectiveness of the coordinated controller compared with conventional controller in generator angle control and voltage control.

Keywords: static var compensator; additional excitation control; fuzzy variable structure control

(上接第 12 页) 大于 S^cr 时,系统是不稳定的;当节点实际功率等于 S^cr 时,则系统是处于临界稳定状态。本文通过实例验证了该结论的正确性,并为快速在线判断电压稳定性提供了很好的方法。

参考文献:

- [1] 刘永强.电压静态稳定性及失稳机理研究[D].华南理工大学博士学位论文第五章,1999.
- [2] 李欣然,贺仁睦,等.负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J].中国电机工程学报,1999,19(4).
- [3] 蔡大用.静态潮流的多解性和快速算法[J].电力系统自动化,2000,24(10).

- [4] 王漪.节点电压稳定 $Z-V$ 空间解析[D].哈尔滨工业大学博士学位论文第二章,1999.
- [5] Khoi Vu. Use of Local Measurements to Estimate Voltage stability Margin [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(3).
- [6] 付英,李兴源.基于静态等值的在线实时电压稳定性分析[J].电力系统自动化,1997,21(17).

收稿日期: 2001-09-26

作者简介: 李宝国(1966-),男,硕士,讲师,研究方向为电力系统稳定分析与控制; 鲁宝春(1964-),男,博士后,教授,研究方向为电力系统稳定分析与控制; 巴金祥(1966-),男,硕士,讲师,研究方向为电力系统稳定与微机保护。

Load type components influence on steady-state voltage stability

LI Bao-guo, LU Bao-chun, YAN Tian, BA Jin-xiang

(Information Science & Engineering Dept. of Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: This paper reviews steady-state voltage stability based on $U-I$ characteristics first. A new method is preferred for steady-state voltage stability criterion after studying influence of load type components. This method is more practical and simple than the former. This paper is also presents a method of calculating load limit. It is suitable for online real-time voltage stability analysis.

Keywords: voltage stability; $U-I$ characteristics; load type components