文章编号:1671-251X(2012)02-0044-05　　DOI:CNKI:32-1627/TP.20120113.1314.013

负荷动态特性变化对电力系统静态电压稳定性的影响研究

段俊东，　黄家兴

(河南理工大学电气工程与自动化学院，河南 焦作　454003)

摘要:针对负荷动态特性激发电压的动态变化而且在极端情况下可能导致电压崩溃的问题,将转差率引入负荷等效阻抗模型对负荷的阻抗模及阻抗角进行了分析,得出了负荷的阻抗模及阻抗角的突变点;基于该模型对负荷动态特性进行了分析,讨论了负荷变化时节点的电压及功率变化情况,得出了节点电压转折点和节点功率转折点;结合三元电压稳定分析法推导出的传输网络的电压稳定极限曲线,利用算例分析了不同的负荷比例对电力系统静态电压稳定性的影响,从而得出了恒阻抗负荷比例的增加有利于增强电力系统静态电压稳定性的结论。

关键词:电力系统;静态电压稳定性;负荷动态特性;三元电压稳定分析法;等效阻抗负荷模型;转差率;阻抗模;阻抗角

中图分类号:TD608　　文献标识码:A　　网络出版时间:2012-01-13 13:14

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20120113.1314.013.html

Research of Influence of Change of Load Dynamic Characteristics on Static Voltage Stability of Power System

DUAN Jun-dong,　HUANG Jia-xing

(School of Electrical Engineering and Automation of Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In view of problems that load dynamic characteristics excited dynamic change of voltage and would cause voltage collapse under extreme case, the paper introduced slip ratio into load equivalent impedance model to analyze load impedance module and load impedance angle, which obtained catastrophe point of load impedance module and load impedance angle. It analyzed load dynamic characteristics by use of the model and discussed changes of voltage and power of node when load changed, which obtained turning points of node voltage and node power. It analyzed influence of different load proportion on static voltage stability of power system by an example through combining with voltage stability limit curve of transmission network which was deduced by three element voltage stability analysis method, so as to reach a conclusion that increasing proportion of constant impedance load would be helpful to enhance static voltage stability of power system.

Key words: power system, static voltage stability, load dynamic characteristic, three element voltage stability analysis method, equivalent impedance load model, slip ratio, impedance module, impedance angle

---

收稿日期:2011-11-18

作者简介:段俊东(1969-),男,河南焦作人,副教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为电力系统分析与控制。E-mail:jundongd@hpu.edu.cn

0 引言

负荷特性是影响电压稳定性的关键因素，它激发电压的动态变化而且在极端情况下可能导致电压崩溃。例如 1987 年的日本东京停电事故就是由于新电子控制的空调器的特性引起的。事件中由于空调在低电压时吸取了更多的无功电流，使视在导纳增加，这种负荷特性有加速电压崩溃的作用。因此，近年来，越来越多的国内外学者开始关注负荷特性。

参考文献[1]推导出计及负荷静态电压特性的静态电压稳定条件，并指出：电力系统在鼻形曲线上半支运行时的静态电压稳定性主要取决于传输网络的电压—功率传输特性，而电力系统在鼻形曲线下半支运行时的静态电压稳定性则主要取决于负荷的静态电压特性。参考文献[2]建立了计及感应电动机机电暂态过程的单负荷无穷大系统的小干扰电压稳定分析数学模型，并利用该模型分析了计及感应电动机负荷的静态电压稳定性。参考文献[3]采用变导纳法分析了感应电动机电压特性对 $P-U$ 曲线和静态电压稳定性的影响，但由于 $P-U$ 曲线本身跟电力系统运行状态有关，该文未能体现电力系统运行状态变化时，感应电动机电压特性对电压稳定性的影响。参考文献[4]通过研究电压稳定域与幂函数模型的关系，说明了负荷特性对电压稳定性的影响。参考文献[5]将感应电动机参数转换为线路参数并利用恒功率负荷模型描述感应电动机电压特性，但该文未考虑感应电动机的失稳特性。参考文献[6]通过仿真表明了动态负荷模型比例的调整会引起电网失稳模式的变化，且在不同失稳模式下，对电网稳定性的影响不同。参考文献[7]基于电力系统电压静态稳定的观点对节点临界状态进行了研究，利用简单电力系统等值电路分析了 $P-U$ 曲线描述电压临界状态的不足及当电力系统运行状态变化时，对节点电压临界点位置的影响；采用负荷阻抗角、最大功率和临界电压 3 个参数对电压临界状态进行了重新描述，建立了比较直观的三元电压稳定分析法。

本文在参考文献[6]～[7]的基础上，通过将转差率引入等效阻抗负荷模型对负荷展开分析，讨论了负荷动态特性变化时节点的电压、功率变化情况；并结合三元电压稳定分析法表述的电力系统传输特性，研究负荷的动态特性变化对静态电压稳定性的影响。本文所研究负荷特性也为建立反映实际负荷特性的负荷模型提供了依据。

1 模型分析

基于静态电压稳定性的机理，在研究节点静态电压稳定性时只考虑所研究节点负荷的变化，即不计同步发电机、有载调压变压器和无功补偿设备等元件的动态特性。因此，在电力系统中，从测试负荷节点向系统侧看进去，系统侧可以用戴维南定理等效为一个两节点系统，如图 1 所示。

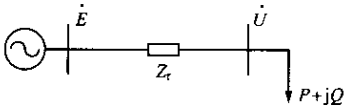


图 1　两节点系统

目前，我国大部分地区电网采用感应电动机和恒阻抗负荷并联的综合负荷模型。由于并联与串联是等价的，因此，将恒阻抗负荷与动态负荷（感应电动机）串联不影响结果，这样就可得到综合负荷的 Γ 型等值电路，如图 2 所示，其中，r_1+jx_1 表示串联恒阻抗负荷；$\frac{c_1 r_2'}{s}+jc_1x_2'$ 表示动态负荷，其大小随转差率 s 变化而变化。以下分析的恒阻抗负荷比例均指串联恒阻抗负荷比例。

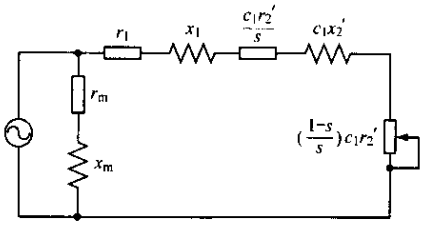


图 2　Γ 型等值电路

综合负荷的阻抗变化是引起负荷特性变化的本质原因。根据图 2，综合负荷的阻抗、功率因数及临界转差率可表述为

$$Z=(r_1+\frac{c_1r_2'}{s})+j(x_1+c_1x_2') \tag{1}$$

$$\cos\varphi=\frac{r_1+\frac{c_1r_2'}{s}}{|Z|} \tag{2}$$

$$s_{cr}=\frac{c_1r_2'}{\sqrt{r_1^2+(x_1+c_1x_2')^2}} \tag{3}$$

式中：$c_1=1+\frac{x_1}{x_m}$。

由式(1)得图 3。从图 3 可看出，在 $0<s<s_{cr}$ 区间，阻抗模 $|Z|$ 随着 s 的增大而急剧减小；在 $s_{cr}<s<1$ 区间，随着 s 的变化，$|Z|$ 基本不变。

由式(2)得图 4。从图 4 可看出，在 $0<s<s_\varphi$ 区间，$\cos\varphi$ 随着 s 的增大而急剧减小；在 $s_\varphi<s<1$ 区

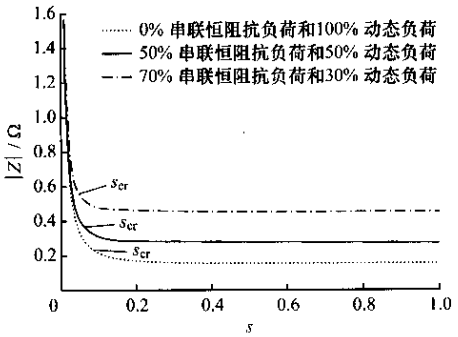


图 3 $|Z|-s$ 曲线

间，随着 s 的变化，$\cos\varphi$ 基本不变。这里的 s_φ 定义为 $\cos\varphi$ 的突变点，$s<s_\varphi$ 时，$\cos\varphi$ 剧烈变化，$s>s_\varphi$ 时，$\cos\varphi$ 变化不明显。

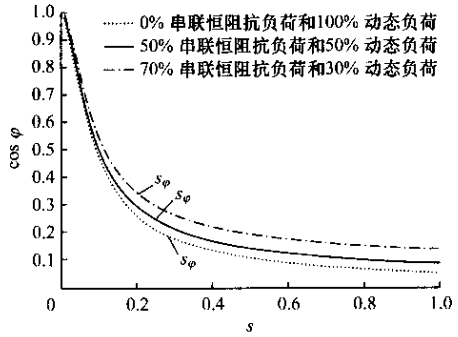


图 4 $\cos\varphi-s$ 曲线

恒阻抗负荷比例的增加，使 $|Z|-s$ 曲线、$\cos\varphi-s$ 曲线均整体上移，增大 $|Z|$ 和 s 的整体水平，有改善 $|Z|$ 和 s 的作用。

因此，不同的 s 与不同的恒阻抗负荷比例均会改变综合负荷的阻抗，进而影响负荷特性的变化。

由式(2)还可得图 5。从图 5 可看出，随着 s 的微增，阻抗角 φ 急剧增大，因此，可进行 $\varphi-s$ 坐标变化，使原先在基于 s 变化而 $|Z|$、$\cos\varphi$ 剧变的小区间上分析负荷特性变换为在基于 φ 的大区间上分析负荷特性，方便后续分析，后续分析中 s 的增大也意味着 φ 的增大，即 $\cos\varphi$ 恶化。

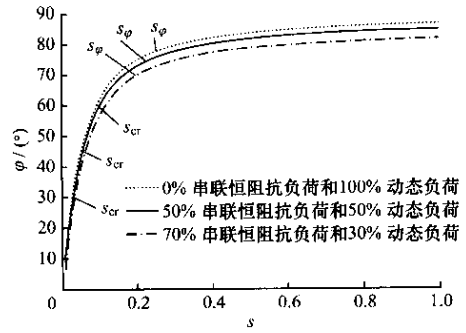


图 5 $\varphi-s$ 曲线

2 等效阻抗负荷模型对负荷特性的分析

由图 2 得负荷特性(电压、功率)计算公式为

$$U^2=\frac{T_e}{N}\frac{s}{r_2}\left[\left(r_1+\frac{c_1r_2'}{s}\right)^2+(x_1+c_1x_2')^2\right] \quad (4)$$

$$P=\frac{U^2}{\left(r_1+\frac{c_1r_2'}{s}\right)^2+(x_1+c_1x_2')^2}\left(r_1+\frac{c_1r_2'}{s}\right) \quad (5)$$

式中：T_e 为额定转矩；r_2 为电动机转子回路的电阻；$N=\frac{m}{\Omega_e}$，m 为电动机的相数，Ω_e 为额定角速度。

(1) 由式(2)、式(4)可得当转矩恒定时节点电压 U 随 φ 的变化曲线，如图 6 所示。随着 φ 的增大即 s 的增大，U 下降，直至 s_φ 时 U 达到最小值，随后，s 继续增大，U 反而上升；由式(2)、式(5)可得节点有功功率 P 随 φ 的变化曲线，如图 7 所示。当 φ 增大即 s 增大时，负荷需求的 P 增大，当 $s=s_{cr}$ 时，负荷需求的 P 达到最大值，随后，s 增大，P 反而减小。

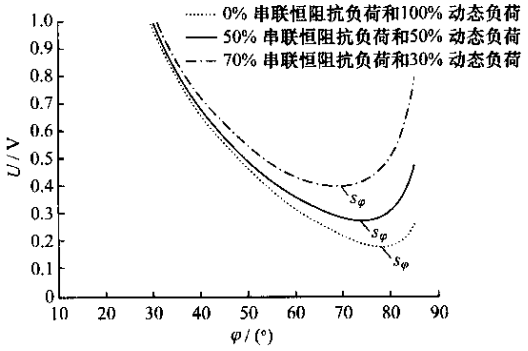


图 6 $U-\varphi$ 曲线

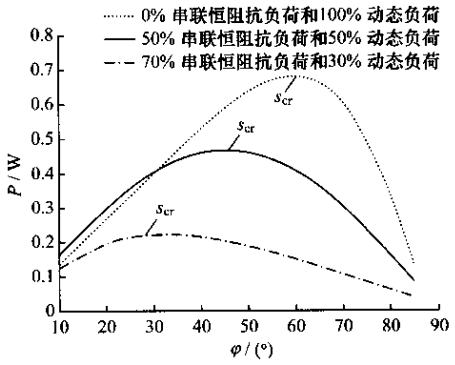


图 7 $P-\varphi$ 曲线

(2) 图 6 中，随着恒阻抗负荷比例的增大，$|Z|$ 增大，导致 $U-\varphi$ 曲线上移，且恒阻抗负荷比例越大，上翘越厉害，s_φ 越小，越有利于电压恢复，这时，类似电动机负荷启动或堵转时定子电流的增大不至于引起节点电压恶化。图 7 中，$P-\varphi$ 曲线随着恒阻抗负荷比例的增大而下移，且恒阻抗负荷比例越大，

s_{cr}越小，即有功功率越容易达到最大值，但这个最大值会越小。

因此，负荷特性对节点电压的影响的转折点（负荷电压临界点）是 s_φ，s_φ 的大小决定了何时电压开始恢复，且对应着节点的最小电压值的大小。而负荷特性对节点有功功率影响的转折点（负荷功率临界点）是 s_{cr}，s_{cr} 的大小决定了何时有功功率达到最大值，且对应着有功功率最大值的大小。

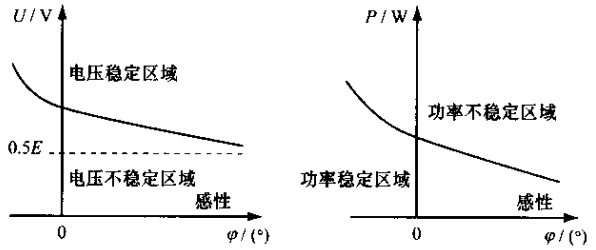
3　电力系统的传输功率特性

由于常规方法中的 $P-U$ 曲线随着当前运行状态的变化而变化，很难得到保持电力系统稳定的明显边界，且电压幅值和角度的变化对有功功率增量和无功功率增量的变化是不一样的。为了克服 $P-U$ 曲线的局限性，本文采用参考文献[7]提出的三元电压稳定分析法来分析负荷动态特性变化对电压稳定性的影响。

在考虑电力系统运行状态变化时，三元电压稳定分析法能够给出明显的电压值边界和功率值边界。它采用负荷阻抗角、最大功率和临界电压 3 个参数来实现对电压临界状态的确切描述。此时，对于图 1 所示的由发电机—输电线—负荷组成的两节点系统，下列结论成立：

(1) 在 $U_{cr}-\varphi$ 曲线（见图 8(a)）的上方为电压稳定区域，下方的电压小于节点电压临界值，为电压不稳定区域。

(2) 在 $P_{max}-\varphi$ 曲线（见图 8(b)）的上方，节点需求的功率值超过系统能够传输的功率，为功率不稳定区域，下方为功率稳定区域。



(a) $U_{cr}-\varphi$ 曲线　　(b) $P_{max}-\varphi$ 曲线

图 8　$U_{cr}-\varphi$ 曲线与 $P_{max}-\varphi$ 曲线

4　算例分析

本文以图 1 所示的两节点系统为例进行分析，选用 IEEE 推荐的第六类工业和民用马达参数。

根据图 6、图 8(a)和图 7、图 8(b)可分别得到节点的 $U-\varphi$ 稳定曲线和 $P-\varphi$ 稳定曲线，分别如图 9、图 10 所示。

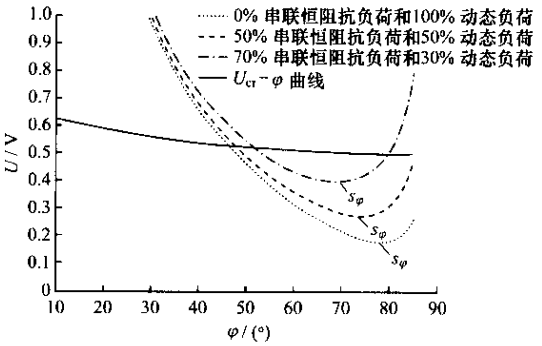


图 9　$U-\varphi$ 稳定曲线

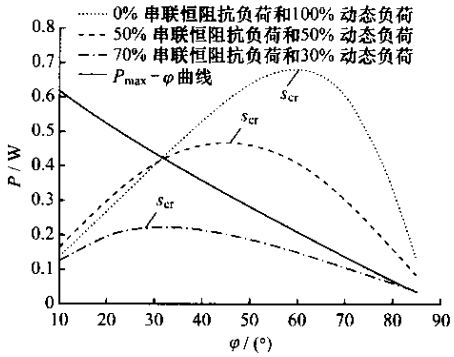


图 10　$P-\varphi$ 稳定曲线

(1) 综合负荷的负荷特性对静态电压稳定性的影响分析

负荷特性随 s 的变化而变化。图 9 中，随着 s 的增大（cos φ 恶化），节点电压减小，最终与 $U_{cr}-\varphi$ 曲线相交，此时若 s 继续增大，电力系统将失稳，但不一定会电压崩溃，这取决于 s_φ 的大小及位置。在 $s>s_\varphi$ 区间，随着 s 的增大，电压逐渐恢复，若能恢复至临界电压，则电力系统稳定；反之，则电压崩溃；图 10 中，随着 s 的增大（φ 的增大），导致 P 增大，直至 s_{cr}时 P 达到最大值，随后，s 增大，P 反而下降，$P-\varphi$曲线可能在 s 未达到 s_{cr}时就与 $P_{max}-\varphi$ 曲线相交，也可能在 s 达到 s_{cr}后才与 $P_{max}-\varphi$ 曲线相交，只要是在相交之前，电力系统都是稳定的。若 s 在达到 s_{cr}前与 $P_{max}-\varphi$ 曲线相交，则随着 s 的增大即 cos φ恶化，电力系统必定会失稳。若 s 达到 s_{cr}后与 $P_{max}-\varphi$ 曲线相交，则电力系统的稳定性取决于系统与负荷功率特性下降程度的比较。

(2) 综合负荷中恒阻抗、动态比例对静态电压稳定性的影响分析

负荷特性随恒阻抗负荷、动态负荷比例的变化而变化。图 9 中，$U-\varphi$ 曲线与 $U_{cr}-\varphi$ 曲线可能有 1 个或 2 个交点。随着动态负荷比例的增加，使得 $U-\varphi$曲线下移，s_φ 增大，s_φ 对应的最小电压值减小，随着 s 的增大即 φ 的增大，$U-\varphi$ 曲线与 $U_{cr}-\varphi$ 曲

线相交，之后，电力系统失稳。但当恒阻抗负荷比例还算较大时（比如动态负荷和恒阻抗负荷比例为 50%∶50%），由于此时 s_φ 小（有足够的空间让电压恢复），s_φ 对应的最小电压值大（失稳时的电压值与临界值的差距小），因此，随着 s 的继续增大，$U-\varphi$ 曲线与 $U_{cr}-\varphi$ 曲线很容易再次相交，电压恢复至稳定状态。但当恒阻抗比例较小（比如动态负荷和恒阻抗负荷比例为 70%∶30%），若电力系统失稳，由于此时 s_φ 大，s_φ 对应的最小电压值小，随着 s 的增大，已无缓冲空间让电压恢复，若无保护措施，电压将崩溃。这说明综合负荷中恒阻抗负荷比例的增加有助于 s_φ 减小，从而提高 s_φ 对应的最小电压值，增强电压的稳定性。

图 10 中，$P-\varphi$ 曲线与 $P_{max}-\varphi$ 曲线可能无交点或 1 个交点，当恒阻抗负荷与动态负荷比例为 70%∶30%时，$P-\varphi$ 曲线与 $P_{max}-\varphi$ 曲线无交点，电力系统一直处于功率平衡状态。但随着动态负荷比例的增加，s_{cr}增大，s_{cr}对应的有功功率最大值也增大，曲线上移，稳定阻抗角减小，就有一部分曲线落在不稳定区域。而动态负荷比例越大，s_{cr}越大，曲线越多落在不稳定区域。反之，恒阻抗负荷比例增大，s_{cr}减小，与 s_{cr}相应的有功功率最大值减小，但曲线却越多落在稳定区域，这说明随着恒阻抗负荷比例的增加，有利于节点的功率平衡，但 s_{cr}的减小，也相应减小了有功功率最大值，若此时线路轻载，则不利于功率传输，若线路重载，则有利于减载，利于稳定。

（3）算例分析也间接说明了 1987 年的日本东京停电事件的原因：随着越多的空调负荷的投入，s 增大，$\cos\varphi$ 恶化，负荷需求的有功功率、无功功率都增大，电压下降至电压临界值，而此事件的主要用电设备是空调，属动态负荷范畴，动态负荷越多，s_φ 越大，电力系统越不容易重新恢复电压稳定，最终导致停电事件。

5 结论

采用负荷等效阻抗模型并在三元电压稳定分析法的基础上分析了负荷动态特性变化对静态电压稳定性的影响：

（1）转差率 s 变化会导致综合负荷的阻抗模、功率因数变化，从而引起负荷特性的变化。s_φ 的大小决定了电力系统电压稳定的程度；s_{cr}的大小决定了电力系统可以传输的功率最大值。

（2）综合负荷中恒阻抗负荷、动态负荷比例的不同，使综合负荷呈现不同的负荷特性，对静态电压稳定性的影响各有不同，恒阻抗负荷比例增大，使 s_φ 和 s_{cr}都减小，这就有利于电压稳定，当节点为重负荷节点时，负荷特性对电力系统的稳定性影响程度就相应减小。

（3）恒阻抗负荷比例的增大有利于改善稳定性，但当其过大时不利于系统功率的传输。因此，适当的负荷比例可使电力系统在电压稳定的条件下传输尽可能多的功率。

参考文献：

[1] 李欣然，贺仁睦，章健，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)：27-31.

[2] 孙华东，周孝信，李若梅. 计及感应电动机负荷的静态电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2005，25(24)：1-7.

[3] 王新宝，韩祯祥. 计及感应电动机静态特性的 PV 曲线分析[J]. 电力系统自动化，2004，28(2)：32-36.

[4] SAUER P W, LESIEUTRE B C, PAI M A. Maximum Load-ability and Voltage Stability in Power Systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1993, 15(3): 145-154.

[5] HAJAGOS L M, DANAI B. Laboratory Measurements and Models of Modern Loads and Their Effect on Voltage Stability[J]. IEEE Transactions on Power System, 1998, 13(2): 584-592.

[6] 张鹏飞，罗秉廉，孟远景，等. 动态负荷模型比例对电网稳定性影响分析[J]. 继电器，2006，34(11)：29-31，53.

[7] 段俊东，郭志忠，魏成江. 电压稳定临界域的描述及在线近似确定[J]. 继电器，2007，35(17)：56-60.