

一种绘制 $P-V$ 曲线的快速方法

李宝国,鲁宝春,巴金祥

(辽宁工学院信息科学与工程系,辽宁 锦州 121001)

摘要: 回顾了电压稳定的基本概念,提出了一种静态等值的新方法;同时提出了利用该方法的静态等值结果,快速绘制 $P-V$ 、 $Q-V$ 曲线的方法。数字仿真结果表明,该方法与实际潮流计算绘制的 $P-V$ 、 $Q-V$ 曲线在上半支和鼻形点附近均吻合得很好,从而验证了该方法的有效性。

关键词: $P-V$ 曲线; 静态等值; 电压稳定

中图分类号: TM769

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2002)02-0013-03

1 引言

电力系统是一个复杂的非线性系统,随着电网规模的日益扩大,电压失稳的潜在性日益严重。八十年代以来,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问题受到了人们广泛的关注和重视。国内外学者提出了许多电压稳定性的实用判据和静态安全指标,但对于大规模电力系统的实时分析和控制均不够方便迅速^[1]。

$P-V$ 曲线的绘制在电力系统电压稳定的研究和分析中相当重要。其绘制方法通常是在某种运行方式下,对某节点或某一区域的负荷以某种方式增长,得到一系列的潮流解,从而绘制 $P-V$ 曲线,该方法的实时性较差。而简单系统的绘制方法简单、快速,如果将复杂系统等值为简单系统,会出现误差,但在满足实际工程要求的基础上,这种等值会使问题得到极大地简化。但目前常用的静态等值方法均涉及网络的化简,故非常费时。^[2]

为此,本文提出了一种静态等值方法,并利用该方法的静态等值结果绘制了 $P-V$ 、 $Q-V$ 曲线。

2 电力系统的电压稳定性

无论系统如何复杂,从系统中某节点向系统看,在任意瞬间都可以把系统等值为一个电势源经传输线阻抗向节点供电的一个单机系统^[3],如图1所示。

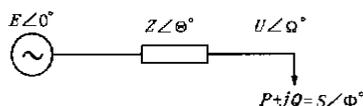


图1 节点等值图

图中线路上的传输功率可表示为:

$$P = \frac{EU}{Z} \cos(\delta - \theta) - \frac{U^2}{Z} \cos\theta \quad (1)$$

$$Q = \frac{EU}{Z} \sin(\delta - \theta) - \frac{U^2}{Z} \sin\theta \quad (2)$$

从式(1)和式(2)中消去 δ , 可得受端电压与负荷的关系:

$$\left(P + \frac{U^2}{Z} \cos\theta \right)^2 + \left(Q + \frac{U^2}{Z} \sin\theta \right)^2 = \left(\frac{EU}{Z} \right)^2 \quad (3)$$

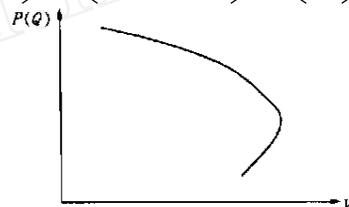


图2 节点 $P-V(Q-V)$ 曲线

当 E, Z, θ 为定值时,由式(3)可绘制 $P-V$ 、 $Q-V$ 特性曲线(如图2)。在特性曲线到达鼻形点时,电压迅速下降;当超过鼻形点时,潮流迭代不收敛,即表明系统失去稳定。

3 系统的静态等值

由上节可见,如果能求得等值系统的 E, Z 和 θ , 即能快速绘制 $P-V$ 曲线,使问题得到极大简化。等值的要求是等值前后系统边界节点的电压和功率保持不变。以前的等值方法都涉及网络导纳矩阵的化简、修改等大量计算,很难应用于在线分析。本文利用一种新的静态等值方法,来求取静态等值参数,即:利用实际系统计算边界条件,再利用所得边界条件求取等值参数。具体步骤如下:

在某种运行方式下,对于给定某节点的 P_1 和 Q_1 , 进行潮流计算,求得该节点的电压 U_1 。

略微改变该节点负荷 P_2, Q_2 和 P_3, Q_3 (负荷仅有略微增长或减小,相当于在运行点线性化), 重新进行潮流计算,求得电压 U_2 和 U_3 。

将三次运行结果分别代入式(3), 即得关于

$E, Z,$ 为未知数的三个方程。

利用牛顿拉夫逊法解方程组,即可求得 $E, Z,$ 值。

上述求取静态等值参数的方法中,考虑了当功率发生微小的变化时,系统的等值参数几乎不变。

表 1 至表 3 是针对 IEEE30 母线系统的第 26 节点在不同负荷下计算得到的结果。

表 1 给出了 ($P=5$) 增加 Q 时的等值结果;表 2 给出了 ($Q=5$) 增加 P 时的等值结果;表 1 给出了 ($\cos \varphi = 0.8357$) 增加 P 和 Q 时的等值结果。

从表 1 可以看出,随着负荷的增加(无论以何种方式), $E, Z,$ 值基本维持不变,只有在接近失稳的临界状态(尤其失稳之后),才有较大的变化。可见,若以 $E, Z,$ 为定值来绘制 $P-V, Q-V$ 特性曲线,分析电压稳定性,误差一定不大。为了进一步减小误差,本文采用 $E, Z,$ 随电压线性变化的方法来绘制 $P-V, Q-V$ 曲线。

4 P-V、Q-V 曲线的绘制方法

$P-V, Q-V$ 曲线的绘制步骤如下:

先用上节的方法计算给定运行方式下的静态等值参数 E_1, Z_1, U_1 和节点电压 U_1 。

再在发散点附近计算该节点的静态等值参数 E_2, Z_2, U_2 和电压 U_2 。

将 $E_1, Z_1, U_1, E_2, Z_2, U_2$ 计算的结果代入下式求取 E, Z 和 U :

表 1 26 节点的 E, Z 和 U 值 ($P=5$)

Q	U	E	Z
1.00	0.9478	1.0416	0.8033
2.00	0.9294	1.0416	0.8037
3.00	0.9100	1.0416	0.8040
4.00	0.8896	1.0416	0.8042
5.00	0.8678	1.0416	0.8044
6.00	0.8446	1.0416	0.8044
7.00	0.8194	1.0416	0.8044
8.00	0.7917	1.0416	0.8044
9.00	0.7608	1.0416	0.8043
10.00	0.7250	1.0418	0.8036
11.00	0.6812	1.0418	0.8045
12.00	0.6191	1.0421	0.8039
12.50	0.5601	1.0422	0.8042
12.55	0.5477	1.0414	0.8044
12.56	0.5454	1.0419	0.8044
12.57	0.5403	1.0419	0.8044
12.58	0.5353	1.0421	0.8045
12.59	0.5266	1.0408	0.8046
12.591	0.5247	1.0430	0.8046
12.59	0.5170	1.0470	0.80477
12.58	0.5083	1.0417	0.8046
12.50	0.4835	1.0414	0.8046
12.00	0.4247	1.0412	0.8046
9.00	0.2867	1.0382	0.8027
5.00	0.1942	1.0151	0.7857
2.00	0.1568	1.0212	0.7899
1.00	0.1499	0.9466	0.7337

$$E = K(E_2 - E_1) + E_1$$

$$Z = K(Z_2 - Z_1) + Z_1$$

$$U = K(U_2 - U_1) + U_1$$

其中 $K = \frac{U - U_1}{U_2 - U_1}$, 是电压的函数。

将 所得结果代入式(3),即可绘制 $P - V, Q - V$ 特性曲线。

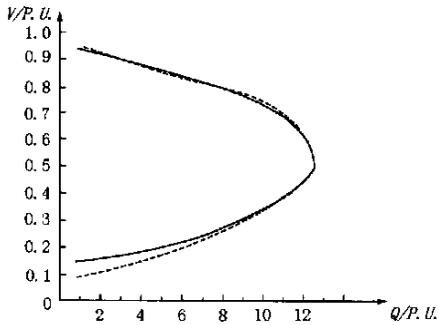
5 数字仿真结果

通过静态等值方法和 $P-V, Q-V$ 特性曲线的绘制方法的论述之后,对其效果进行研究和试验是完全必要的。为此,本文用 IEEE30 母线系统对该方法进行了验证。

图 3 至图 5 给出了该系统第 26 节点的仿真结果。图中实线为系统潮流计算结果,虚线为等值后系统的计算结果。从图中曲线可以看出,利用本文的方法绘制的曲线与系统潮流计算结果绘制的曲线在上半支和鼻形点附近均吻合得很好,但在下半支误差较大,究其原因是由于在下半支的静态等值参数的变化较大。此外,我们还对该系统其它节点做了研究,结果与第 26 节点类似,限于篇幅,不再一一列出。

表 2 26 节点的 E, Z 和 U 值 ($Q=5$)

P	U	E	Z
2.00	0.9253	1.0416	0.8033
3.00	0.9080	1.0416	0.8026
4.00	0.8890	1.0416	0.8043
5.00	0.8678	1.0416	0.8044
6.00	0.8440	1.0416	0.8044
7.00	0.8167	1.0416	0.8044
8.00	0.7845	1.0417	0.8040
9.00	0.7444	1.0415	0.8048
10.00	0.6883	1.0416	0.8046
10.50	0.6438	1.0414	0.8050
10.60	0.6309	1.0415	0.8049
10.70	0.6147	1.0438	0.8040
10.80	0.5885	1.0439	0.8045
10.81	0.5839	1.0459	0.8042
10.82	0.5780	1.0576	0.8025
10.828	0.5609	1.0698	0.8058
10.82	0.5514	1.0420	0.8051
10.81	0.5452	1.0412	0.8050
10.60	0.4956	1.0416	0.8061
10.00	0.4308	1.0422	0.8055
8.00	0.3154	1.0592	0.8166
7.00	0.2668	1.0566	0.8156
5.00	0.1942	1.0151	0.7857
2.00	0.1171	0.9972	0.7712

图3 $P=5$ 时的 $Q-V$ 曲线表3 26节点的 E 、 Z 和 U 值

$P(Q)$	U	E	Z	
1.00	1.0124	1.0416	0.8037	62.3712
2.00	0.9811	1.0416	0.8036	62.3618
3.00	0.9471	1.0416	0.8031	62.2818
4.00	0.9098	1.0417	0.8014	61.9609
5.00	0.8678	1.0416	0.8044	62.4791
6.00	0.8192	1.0416	0.8045	62.5018
7.00	0.7594	1.0417	0.8039	62.3292
8.00	0.6741	1.0416	0.8047	62.5680
8.50	0.5929	1.0421	0.8045	62.2940
8.55	0.5761	1.0504	0.8020	57.7427
8.57	0.5665	1.0421	0.8047	62.3536
8.58	0.5603	1.0460	0.8041	60.4262
8.59	0.5515	1.0555	0.8028	55.2732
8.595	0.5422	1.0417	0.8049	62.5494
8.59	0.5251	1.0420	0.8049	62.4520
8.58	0.5161	1.0442	0.8053	61.5999
8.50	0.4832	1.0418	0.8050	62.5559
8.00	0.4000	1.0402	0.8043	63.0198
7.00	0.3107	1.0409	0.8046	62.8075
5.00	0.1942	1.0151	0.7857	66.5281
2.00	0.0687	0.8436	0.6528	80.8299

6 结论

电力系统是一个具有高度非线性的复杂系统,电力系统的外部系统等值一直是电力系统的一个重要课题。本文提出了一种静态等值的新方法。

利用本文提出的静态等值方法确定的静态等值参数来绘制 $P-V$ 、 $Q-V$ 特性曲线与实际潮流计算结果误差不大,更重要的是简单、快速,完全可以适用

A Fast Method Getting $P-V$ Curve

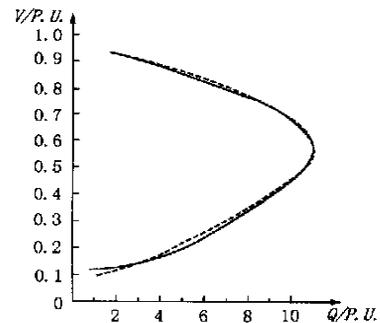
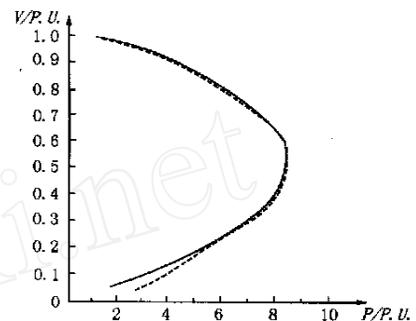
LI Bao-guo, LU Bao-chun, BA Jin-xiang

(Liaoning Institute of Technology, Jinzhou, 121001, China)

Abstract: This paper presents a new method of static equivalence in power system. After analyzing the equivalent numeral results, a fast method getting $P-V$ and $Q-V$ curves is presented. The simulation results show the effectiveness of this method.

Keywords: $P-V$ curve; static equivalence; voltage stability

于实时、在线监测,快速评估电压。

图4 $Q=5$ 时的 $P-V$ 曲线图5 $\cos L = 0.84$ 时的 $P-V$ 曲线

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 张尧.节点PV曲线的快速求解方法[J].电力系统自动化,1999,23(9).
- [3] Khoi Vu. Use of Local Measurements to Estimate Voltage stability Margin [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(3).
- [4] 张伯明.高等电力网络分析[M].清华大学出版社,1995,8.

收稿日期: 2001-09-19; 改回日期:2001-10-30

基金项目: 辽宁省自然科学基金(001081)

辽宁省教委基金(990821100)

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