

文章编号:1673-0062(2017)03-0060-06

风电并网系统静态电压稳定条件研究

闵 杰, 盛义发*, 徐广涛

(南华大学 电气工程学院, 湖南省 衡阳市 421001)

摘 要: 风力发电具有波动性和间歇性, 且分散接入配电网系统, 势必影响并网系统电压稳定性. 首先从静态电压稳定性角度出发, 采用 PV 曲线潮流分析法, 根据风电并网系统潮流计算, 推导出基于潮流解存在的静态电压判据 L 以及基于考虑综合参数的电压—有功灵敏度的静态电压稳定裕度 K_p ; 然后, 研究提出了风电并网系统静态电压稳定充分必要条件, 给出了风电并网系统静态电压稳定性流程框图与判别步骤; 最后, 实验验证了风电并网系统静态电压稳定充分必要条件的正确性. 在此基础上, 提出了改善风电并网系统静态电压稳定性的措施.

关键词: 风电; 静态电压稳定; PV 曲线潮流

中图分类号: TM614

文献标志码: A

Research on Static Voltage Stability of Wind Power Integrated with Power Grid

MIN Jie, SHENG Yi-fa*, XU Guang-tao

(School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Wind power has the characteristics of fluctuation and intermittence and is dispersed into the distribution system, which inevitably affects the voltage stability of Wind Power Integrated Power Systems. Firstly, this paper uses PV flow analysis method from the point of view of static voltage stability, according to calculation method of power flow for Wind Power Integrated Power Systems, to deduce the Static Voltage Criterion (L) of Power Flow Calculation and the static voltage stability margin (K_p) based on voltage active-power sensitivity index. Then, it develops the necessary and sufficient conditions for Wind Power Integrated Power Systems, and gives flow chart of judging static voltage stability; Finally, the correctness of the necessary and sufficient conditions for static voltage sta-

收稿日期: 2017-08-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目子课题(2012CB215106); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201610555003)

作者简介: 闵 杰(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事于电力系统及其自动化研究. E-mail: 179975051@qq.com. * 通讯作者: 盛义发, E-mail: syf871@163.com

bility of Wind Power Integrated Power Systems is verified by experiments. And the measures to improve the static voltage stability of Wind Power Integrated Power Systems are put forward.

key words: wind power; the stability of static voltage; trend analysis of PV curve

0 引言

《风电发展“十三五”规划》指出,预计到 2050 年风电太阳能装机容量为 21.64×10^8 kW,占能源装机总量 55.3%。因此,大规模风力发电能源将并入配电网系统。由于风电机组输出功率具有波动性和间歇性,其势必会影响并网系统电压稳定性^[1-3]。电压稳定性是指在系统给定的初始状态下,电力系统遭受扰动后系统中所有母线维持电压稳定的能力^[4]。

由于风电出力波动性类似于电网系统中负荷的波动,故风电场并网系统电压稳定性研究可归于静态电压稳定性研究^[5]。静态电压失稳被广泛认为是威胁现代电力系统安全稳定运行的主要原因之一。因此,对风电并网系统静态电压稳定性研究具有重要意义。

近年来,电力工作者对风电并网系统静态电压稳定性及静态电压稳定指标进行了相关研究。文献[6-7]分析了风电并网对系统电压稳定性的影响,但没有从具体指标分析影响大小。文献[8-9]基于配电网潮流解的存在性,提出了反映负荷分布与电压稳定性关系的电压稳定判据 L,但即使满足了配电网电压存在,也不能说明其电压是稳定的。文献[10]在 PV 曲线潮流分析法和稳定评估指标的基础上,综合电压—有功功率的裕度指标 K_p ,从静态电压稳定机理上分析风电并网系统静态电压稳定性,由于风电并网系统一般处于配电网系统中,故将线路的综合参数忽略不计以分析裕度指标是不全面的。

综上所述,仅仅只满足单个稳定性判据的风电并网系统静态电压不一定是稳定的,故本文研究风电并网系统静态电压稳定条件,提出基于潮流解存在的静态电压稳定状态指标 L 和考虑综合参数的电压—有功灵敏度的静态电压稳定裕度指标 K_p 。在此基础上,研究了风电并网系统静态电压稳定的充分必要条件,并通过实验验证其正确性。

1 风电并网系统运行机理

风电并网系统可简化为图 1 所示。

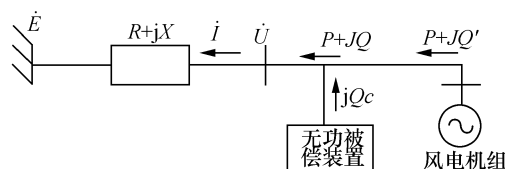


图 1 风电并网简化图

Fig.1 Simplified diagram of wind power integrated with power grid

图中, E 表示系统平衡点电压; U 表示风电场并网点电压; $R+jX$ 表示风电场并网点到系统平衡点等效阻抗; $P+jQ'$ 表示风电场发出的视在功率; $P+jQ$ 表示风电并网点向电网输出视在功率。

如图 1 所示,由电网潮流计算可得

$$\dot{E} = \dot{U} - ZI = \dot{U} - \frac{(R + jX)(P - jQ)}{U^*} \quad (1)$$

$$P + jQ = (U \cos \theta + jU \sin \theta) * \left(\frac{U \cos \theta - jU \sin \theta - E}{R - jX} \right) \quad (2)$$

2 风电并网系统静态电压稳定性指标

2.1 静态电压稳定状态指标 L

将式(1)两边同乘并网点电压 U 的共轭 U^*

$$U_a^2 + U_b^2 = U_a E_a + U_b E_b + PR + QX \quad (3)$$

$$U_b E_a - U_a E_b = PX - QR \quad (4)$$

式中, E_a 、 E_b 分别表示系统平衡点电压向量的实部、虚部; U_a 、 U_b 分别表示风电场并网点电压向量的实部、虚部。联立式(3)、式(4)可得

$$\begin{aligned} E^2 U_b^2 + (PX - QR)^2 + E_a E_b (PX - QR) - \\ E_b^2 (PR + QX) - U_b [2E_a (PX - QR)] + \\ E_b^3 + E_b E_a^2 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E^2 U_a^2 + (PX - QR)^2 - E_a E_b (PX - QR) - \\ E_a^1 (PR + QX) + U_a [2E_b (PX - QR)] - \\ E_a^3 - E_a E_b^2 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

对式(5)、式(6)分别关于 U_a 、 U_b 作根的判别式 $\Delta b^2 - 4ac \geq 0$ 为

$$\begin{aligned} [2E_a (PX - QR + E^1 E_b)]^2 - 4E^2 \cdot \\ [(PX - QR)^2 + E_a E_b (PX - QR) - \\ E_b^2 (PR + QX)] \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & [2E_b(PX - QR) - E^2E_a]^2 - 4E^2 \cdot \\ & [(PX - QR)^2 - E_aE_b(PX - QR) - \\ & E_a^2(PR + QX)] \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)可得

$$E^4 - 4(PX - QR)^2 - 4E^2(PR + QX) \geq 0 \quad (9)$$

根据式(9), 定义静态电压稳定状态指标

$$L = \frac{4}{E^4} [(PX - QR)^2 + E^2(PR + QX)].$$

当且仅当式(7)和式(8)同时成立, 风电场并网点电压在潮流解方程组中才有实根, 即系统并网点电压存在, 可得到式(9)成立, 进而等效 $L \leq 1$. 指标 L 在一定程度上反映负荷 $P+jQ$ 与系统静态电压稳定的关系, L 越小, 系统静态电压越稳定.

2.2 静态电压稳定裕度指标 K_p

以式(2)为基础, 由实、虚部相等, 可得

$$P = \frac{UE(X\sin\theta - R\cos\theta) + U^2R}{R^2 + X^2} \quad (10)$$

$$Q = \frac{-UE(X\cos\theta + R\sin\theta) + U^2X}{R^2 + X^2} \quad (11)$$

将式(10)、式(11)化简得

$$U^2 = \frac{E^2}{2} + PR + QX \pm$$

$$\sqrt{\frac{E^4}{4} + E^2PR + E^2QX - (PX - QR)^2} \quad (12)$$

由式(12)可得 PV 曲线, 如图 2 所示.

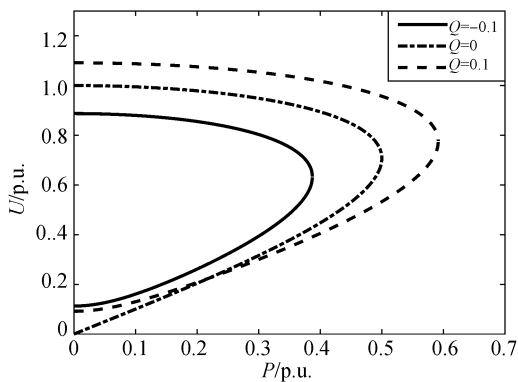


图 2 PV 曲线

Fig.2 Curve of PV

由图(2)可得:

1) 并网点输出无功功率 Q 一定时, 随着风电场并网点输出有功功率 P 的增加, 并网点电压逐步减少, 而且下降幅度越来越大. 当并网点电压达

到崩溃点, 风电场输出有功功率达到最大值.

2) 随着并网点输出无功功率 Q 的增大, PV 曲线覆盖范围也越广, 电压崩溃点所对应的最大输出有功功率也随之增大.

3) 并网点电压取得崩溃点电压时, 对应的是 PV 曲线图中其斜率 $\frac{dU}{dP}$ 最大, 即电压—有功灵敏度

度最大. 取 $M = \frac{E^4}{4} + E^2PR + E^2QX - (PX - QR)^2$.

根据式(12), 求取 U 对 P 的偏导 $\frac{\partial U}{\partial P}$ 为

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \frac{1}{2U} \left[R \pm \frac{\left(\frac{E^2}{2} + QX \right) R - PX^2}{M^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (13)$$

式中, $\frac{\partial U}{\partial P}$ 表示电压—有功灵敏度.

因此, 为求得并网点电压崩溃点所对应的最大输出功率. 当 $M=0$ 时, $\frac{\partial U}{\partial P} = \infty$. 利用求根公式得

$$P_{\max} = \frac{\sqrt{E^2(R^2 + X^2)(E^2 + 4QX)}}{2X^2} + \frac{E^2R - 2RQX}{2X^2} \quad (14)$$

定义静态电压稳定裕度指标 K_p 为

$$K_p = \frac{P_{\max} - P_0}{P_{\max}} \quad (15)$$

式中, P_0 表示当前状态风电并网点输出的有功功率; $P_{\max}$ 取式(14)的潮流计算结果; K_p 表示当前运行点到系统崩溃运行点的距离程度大小; 当 $K_p=0$ 时, P_0 达到崩溃点所对应的有功功率 $P_{\max}$; 当 $K_p>0$ 时, 即系统静态电压稳定; 反之, 系统静态电压失稳.

3 风电并网系统静态电压稳定充分必要条件

3.1 充分必要条件

从逻辑推理关系上看, 充分条件、必要条件和充要条件是重要的数学概念, 主要是用来区分命题的条件 p 和结论 q 之间的下列关系:

(1) 若 $p \Rightarrow q$ 为真, 则 p 是 q 的充分条件;

(2) 若 $q \Rightarrow p$ 为真, 则 p 是 q 的必要条件;

(3) 若 $p \Rightarrow q$ 为真, 且 $q \Rightarrow p$ 为真, 则 p 是 q 的充分必要条件.

其中 $\Rightarrow$ 表示推导可得.

3.2 静态电压稳定充分必要条件

基于风电并网系统潮流解存在性得到的状态指标 L 以及裕度指标 K_p , 研究了风电并网系统静态电压稳定性的充分必要条件。

分析式(7)~式(15)之间的关系可得:

1) 当风电并网系统静态电压稳定时, 可推出风电场并网点电压在潮流解方程组中有实根, 式(7)和式(8)同时成立, 将两式相加可得出 $L \leq 1$;

2) 当 $L \leq 1$, 即式(9)成立时, 但不一定能满足式(7)和式(8)同时成立, 也就不能满足潮流解方程组关于并网点电压存在实根, 也就不能保证风电并网系统静态电压稳定。

3) 依据指标 K_p 表征当前运行点到系统崩溃运行点的距离程度大小, 指标 K_p 只需满足系统的要求, 风电并网系统静态电压则稳定, 反之, 则失稳。即:

静态电压稳定 $\Rightarrow L \leq 1$;

$K_p > 0 \Rightarrow$ 静态电压稳定;

$K_p > 0$ & $L \leq 1$ 为真 $\Leftrightarrow$ 静态电压稳定

综上所述, 指标 $L \leq 1, K_p > 0$ 作为判别风电并网系统静态电压稳定的充分必要条件。因此, 风电并网系统静态电压稳定性流程框图如图 3 所示。

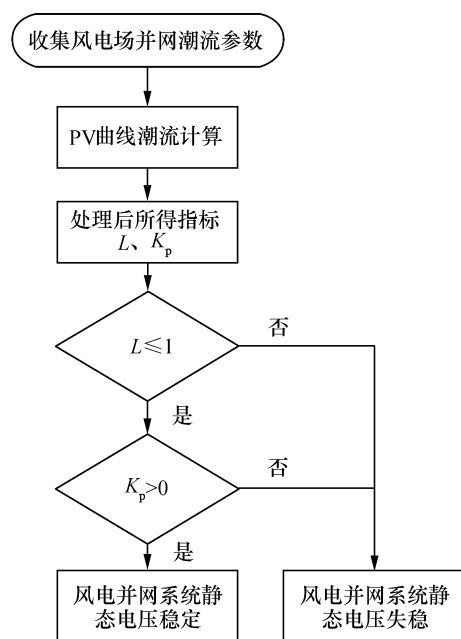


图 3 判别静态电压稳定性流程图

Fig.3 Flow chart of distinguishing static voltage stability

图中, 其具体判别步骤如下:

1) 收集风电并网系统潮流参数, 进行潮流计算;

2) 将潮流计算得到结果得到静态电压稳定性状态指标 L 和裕度指标 K_p ;

3) 分别判断 L 和 K_p 指标是否满足要求, 当且仅当两指标同时满足要求时, 即满足风电并网系统静态电压稳定性充分必要条件, 则风电并网系统静态电压稳定, 反之, 风电并网系统静态电压失稳。

4 系统实验及结果分析

针对前面提到的判别风电并网点静态电压稳定流程图为基础, 建立判别风电并网系统静态电压稳定性的 Simulink 仿真模型如图 4 所示。

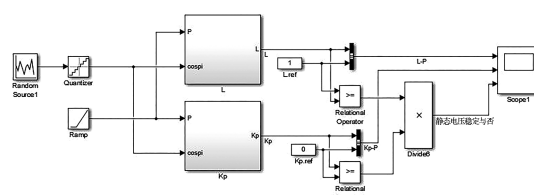


图 4 判别静态电压稳定性的仿真模型

Fig.4 Simulation model of distinguishing static voltage stability

在 Simulink 仿真模型中, 做如下设置:

1) 有功功率 P 从 0 均匀增长到 1.0 p.u., 无功功率 Q 随着 P 以及功率因数 $\cos \varphi$ 的变化而变化, 本文引用 Random 模块作功率因素 $\cos \varphi$ 在区间 $[0.9, 1.0]$ 内随机变化;

2) 建立基于潮流解存在状态指标 L 模块和基于电压—有功灵敏度裕度指标 K_p 模块, 即图 4 中的 L 模块以及 K_p 模块;

3) 以 $L \leq 1$ 以及 $K_p > 0$ 作为系统静态电压稳定性的充分必要条件。当且仅当上述两判据同时成立, 系统静态电压稳定; 反之, 系统静态电压失稳。

运行上述仿真模型, 如图 5 所示, 可得如下结论:

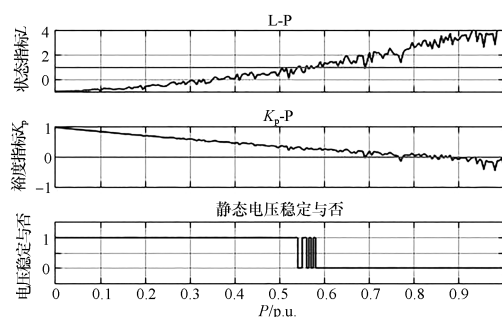


图 5 系统静态电压稳定性仿真结果

Fig.5 Simulation results of static voltage stability

1)如图 $L \sim P$ 所示,随着有功功率 P 的增加,指标 L 在大趋势下是增长的,并且在 $P = 0.539$ p.u.左右首次达到临界值 1 以上;

2)如图 $K_p \sim P$ 所示,随着有功功率 P 的增加, K_p 在大趋势下是减小的,并且在 $P = 0.689$ p.u.左右首次达到临界值 0 以下;

3)如图静态电压稳定与否所示,当且仅当系统满足 $L \leq 1, K_p > 0$ 时,系统静态电压是稳定的.

为更详细的分析风电并网系统静态电压稳定性机理.将 P 从 0 至 1.0 p.u.的静态电压稳定性指标具体数值列于表 1.

表 1 静态电压稳定指标具体数值

Table.1 Specific values of static voltage stability index

有功功率 $P/(p.u.)$	功率因素 ($\cos \varphi$)	L	K_p	静态电压 稳定与否
0.1	0.93	-0.95	0.855	稳定
0.2	1.0	-0.577	0.722	稳定
0.4	0.96	0.041	0.460	稳定
0.5	0.99	0.583	0.352	稳定
0.55	0.95	0.657	0.266	稳定
0.6	0.99	1.278	0.276	失稳
0.69	0.98	0.904	-0.029	失稳
0.8	0.95	2.612	0.053	失稳
0.9	0.96	3.290	-0.065	失稳
0.95	0.95	2.628	-0.424	失稳
1.0	0.90	3.570	-0.298	失稳

由表 1 可知,系统会出现不能同时满足静态电压稳定充分必要条件情况.当 $P = 0.6$ p.u., $\cos \varphi = 0.99$ 时, $L = 1.278, K_p = 0.276$,虽然 K_p 满足 $K_p > 0$,但是 L 不满足 $L \leq 1$,故其静态电压失稳.当 $P = 0.69$ p.u.时, $\cos \varphi = 0.98$ 时, $L = 0.904, K_p = -0.029$,虽然 L 满足 $L \leq 1$,但是 K_p 不满足 $K_p > 0$,故其静态电压失稳.

因此,表明了 $K_p > 0$ & $L \leq 1$ 作为系统电压稳定充分必要条件正确性;单单考虑指标 L 或指标 K_p 来判别风电并网系统静态电压稳定性是不够充分.

为研究改善风电并网系统静态电压稳定性的措施.如图 6~图 8 所示,在 Simulink 仿真模型中分别设置风电并网点功率因素 $\cos \varphi = 0.85$ 、 $\cos \varphi = 0.95$ 、 $\cos \varphi = 1$,并得到其仿真结果.

对比图 6~图 8 可知,随着并网点的功率因素 $\cos \varphi$ 从 0.85 增加到 1,静态电压不稳定点从 $P = 0.462$ p.u.提高到 0.671 p.u.,故提高系统并网点

的功率因素就可以提高风电并网点的静态电压稳定性.在实际工程实际中,多用并联无功补偿等措施来提高系统的功率因素.如并联 SVC 等响应快速的无功补偿装置.

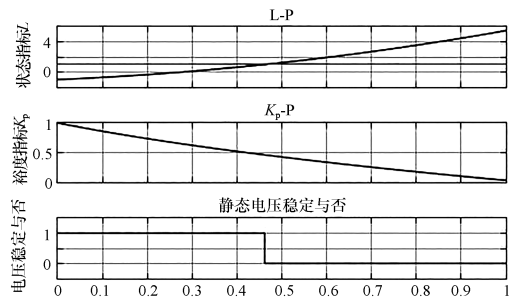


图 6 静态电压稳定性结果 ($\cos \varphi = 0.85$)

Fig.6 Results of static voltage stability ($\cos \varphi = 0.85$)

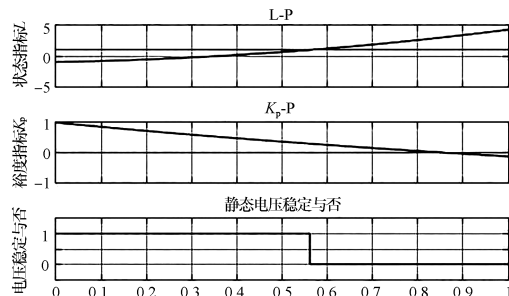


图 7 静态电压稳定性结果 ($\cos \varphi = 0.95$)

Fig.7 Results of static voltage stability ($\cos \varphi = 0.95$)

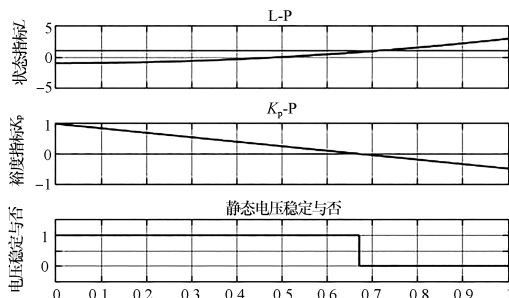


图 8 静态电压稳定性结果 ($\cos \varphi = 1$)

Fig.8 Results of static voltage stability ($\cos \varphi = 1$)

综上所述,相同有功功率输出,风电场若能提供足够的无功支撑,风电并网系统静态电压稳定性越高.

5 结 论

本文基于风电出力的随机性、波动性类似于电网系统中负荷的波动,将风电场并网系统电压稳定性分析归于静态电压稳定分析,其主要结论

如下:

1) 研究了风电并网运行的机理,采用 PV 曲线潮流分析法,推导出系统静态电压稳定性指标.

2) 提出了风电并网系统静态电压稳定充分必要条件: $K_p > 0$ & $L \leq 1$,给出了风电并网系统静态电压稳定性流程框图与判别步骤;实验验证了风电并网系统静态电压稳定充分必要条件的正确性.

3) 提出了采用并联 SVC 等响应快速的无功补偿装置以提高风电并网系统静态电压稳定性.

参考文献:

- [1] HOSSAIN M J, POTA H R, MAHMUD M A, et al. Investigation of the impacts of large-scale wind power penetration on the angle and voltage stability of power systems[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 76-84.
- [2] 谭季秋, 卿上乐. 兆瓦级垂直轴风力发电机组仿生塔架性能分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2014, 28(2): 54-60.
- [3] KABOURIS J, KANELLOS F D. Impacts of large-scale wind penetration on designing and operation of electric power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(2): 107-114.
- [4] 汤涌, 仲悟之, 孙华东, 等. 电力系统电压稳定机理研究[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 24-29.
- [5] VITTAL E, O'MALLEY M, KEANE A. A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetrations of wind[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 433-442.
- [6] 殷桂梁, 马会艳, 陈学琴. 电网电压波动时双馈电机的无功补偿特性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 84-88.
- [7] 熊传平, 张晓华, 孟远景, 等. 考虑大规模风电接入的系统静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 132-137.
- [8] 武晓朦, 刘健, 毕鹏翔. 配电网电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 31-35.
- [9] 蒋斌, 吴健, 冯亮, 等. 含分布式发电的有源配电网电压稳态指标计算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 885-891.
- [10] 许晓艳, 马烁, 黄越辉, 等. 大规模风电接入对电网静态电压稳定性影响机理研究[J]. 中国电力, 2015, 48(3): 139-143.