

基于近似线性规划和暂态稳定分析 的风电场穿透功率极限计算

廖 萍¹, 李兴源²

(1. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072; 2. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 简要介绍了风力发电的现状, 指出了确定风电场穿透功率极限的重要性。提出了一种将近似线性规划与暂态稳定分析相结合的方法, 将原计算风电场容量的非线性目标约束函数作线性化, 再应用线性近似解法去逼近非线性真实解。通过暂态仿真结果与优化算法相交替的计算, 得到最终解。通过 36 节点系统进行仿真计算, 验证了该方法的有效性及其快速准确性。

关键词: 风力发电; 风电穿透极限; 近似线性规划; 暂态稳定

Abstract: The actuality of wind power generation is introduced in brief. Then the importance of wind power penetration limit is pointed out. An optimal method based on approximate linear programming and transient stability is introduced for calculating the wind farm penetration. This method gets the object function and constraint function approximately linearized firstly. Then it uses linear solution to find the accurate solution. The final solution can get from the transient simulation and optimal method. The results of 36-node system demonstrate that this method is rapid, precise and effective.

Key words: wind power generation; wind power penetration limit; approximate linear programming; transient stability

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0023-04

0 引 言

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。在 20 世纪的 100 年里, 世界能源消耗量增加了约 9 倍。根据国际能源机构 (IEA) 的预测, 未来 25 年里世界能源需求总量还将增加近 1 倍^[1]。因此, 对风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等可再生能源的开发利用, 是世界各国能源领域的热点问题。风是人们非常熟悉的一种自然现象, 它是因太阳加热空气, 热空气上升, 冷空气适时地补充导致空气流动而形成的, 其中蕴藏着巨大的能量。按照不同的需要, 风能可以被转换成其它不同形式的能量, 如机械能、电能、热能等。由于电能所具有的无可比拟的优越性, 将风能转换成电能, 即风力发电, 便成为人们利用风能的首选, 并在近年来得到迅速发展^[2]。

随着世界上风力发电项目数量的增加和规模的扩大, 风电规划中的问题已明显地暴露出来^[3]。大型风电场并网运行对电力系统的影响越来越明显, 大规模的风电并网运行对系统供电质量和可靠性的影响也受到更多的关注。因此, 确定一个风电场的穿透功率极限及其影响因素成为规划设计风电场时迫切

需要解决的问题^[4]。

风电场并网容量的增加会使系统电压和频率产生偏差、电压发生波动和闪变、电压稳定性受到影响等, 且系统为减小风电场发电间歇性对系统的影响而必须增加旋转备用容量, 从而使系统可靠性和经济性下降。因此计算风电场穿透功率极限非常重要, 但由于涉及的因素较多, 范围较广, 至今还没有统一的算法和公式^[5]。数值仿真方法是一种校验系统动态特性的方法, 通过比较各组数据确定穿透功率极限。带约束的优化方法则是利用优化算法对整个问题进行数学化的求解, 最终得到一个确定的值, 其不足在于没有考虑各种扰动因素的影响。通过分析现有方法的优缺点, 提出一种基于近似线性规划和暂态稳定分析的方法, 求取风电场穿透功率极限。

1 风电场穿透功率极限的基本概念

关于风电场穿透功率极限的定义有多种形式。1998 年的国际大电网会上 J. F. Christensen 等人提出的风电场穿透功率极限指系统所能接受的风电场最大容量和系统最大负荷的比值。R. A. Schlueter 等人将风电场穿透功率极限看作是系统所能接受的风电

场最大容量与系统容量的比值^[5]。考虑到中国的实际情况,将风电场穿透功率极限定义为系统能够接受的最大风电场装机容量占系统最大负荷的百分比。

风电场穿透功率极限 =

$$\frac{\text{系统能够接受的最大风电场装机容量}}{\text{系统最大负荷}} \times 100\% \quad (1)$$

2 基于近似线性规划和暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算模型

并网风电场穿透功率极限实质是在可以使用的控制手段、优化运行策略实施以后,能够保证系统的稳定水平、安全运行及电能质量不受影响的前提下,系统最多可以接受的风电功率(或容量)。如果把系统可以接受的风电功率(或容量)最大化作为目标,把影响系统稳定的电压和频率作为约束条件,那么,风电场的最大注入功率在数学意义上的实质就是最优化(或说最大化)问题。

根据线性规划理论,可以得到数学模型为^[6]

$$\begin{aligned} \max F(w) &= w \\ \text{s t } u_{\min} &\leq u(w) \leq u_{\max} \\ f_{\min} &\leq f(w) \leq f_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, w 为风电场容量; $u(w)$ 为系统节点电压标么值; $f(w)$ 为系统频率标么值; u_{\min} 、 f_{\min} 、 u_{\max} 、 f_{\max} 分别为系统电压和频率的极限值。

考虑到系统在一定的运行方式下,风电场容量的增加会导致系统暂态变化加大。也就是说,系统在极端的运行方式下,随着风电场容量的逐渐增加,系统电压和频率的暂态值会越升越高或越降越低,二者的变化方向是一致的。基于上述分析,可以将式(2)做如下变换。

$$\begin{aligned} \max F(w) &= X_u(w) + X_f(w) \\ \text{s t } X_u(w) &= \left| \frac{u_n(0) - u_n(w)}{u_n(0) - u} \right| \leq 1 \\ X_f(w) &= \left| \frac{f_n(0) - f_n(w)}{f_n(0) - f} \right| \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, w 为风电场容量。若系统节点电压值随风电场容量增加而升高,则令 u_m 为系统节点电压最大值, u 为系统节点电压上限值;反之, u_m 为系统节点电压最小值, u 为系统节点电压下限值。 f_m 、 f 定义同上。 $X_u(w)$ 、 $X_f(w)$ 表示系统电压、频率能越限的程度,当其值为 1 时,相应的电压或频率达到约束条件的边界值。当风电场容量增加时,系统电压和频率的暂态值

偏移加大, $X_u(w)$ 、 $X_f(w)$ 单调递增,它们的和 $F(w)$ 为一单调递增函数。在满足稳定约束条件下,当风电场容量达到穿透功率极限时, $F(w)$ 值最大。

假设风电场最大容量有一近似值 $w^{(k)}$, 在 $w^{(k)}$ 处将 $F(w)$ 、 $X_u(w)$ 和 $X_f(w)$ 作线性展开

$$\begin{aligned} F(w) &\approx F(w^{(k)}) + (w - w^{(k)}) \nabla F(w^{(k)}) \\ X_u(w) &\approx X_u(w^{(k)}) + (w - w^{(k)}) \nabla X_u(w^{(k)}) \\ X_f(w) &\approx X_f(w^{(k)}) + (w - w^{(k)}) \nabla X_f(w^{(k)}) \end{aligned} \quad (4)$$

上式中的 $F(w)$ 、 $X_u(w)$ 和 $X_f(w)$ 的一阶导数可分别用下式近似得

$$\begin{aligned} \nabla F(w^{(k)}) &= \frac{F(w^{(k)}) - F(w^{(k-1)})}{w^{(k)} - w^{(k-1)}} \\ \nabla X_u(w^{(k)}) &= \frac{X_u(w^{(k)}) - X_u(w^{(k-1)})}{w^{(k)} - w^{(k-1)}} \\ \nabla X_f(w^{(k)}) &= \frac{X_f(w^{(k)}) - X_f(w^{(k-1)})}{w^{(k)} - w^{(k-1)}} \end{aligned} \quad (5)$$

将公式(4)、(5)代入公式(3),整理后得到式(3)的近似线性规划为

$$\begin{cases} \max w \nabla F(w^{(k)}) + F(w^{(k)}) - w^{(k)} \nabla F(w^{(k)}) \\ w \leq \min(w_u^{(k)}, w_f^{(k)}) \\ w_u^{(k)} = w_u^{(k)} + \frac{1 - X_u(w^{(k)})}{\nabla X_u(w^{(k)})} \\ w_f^{(k)} = w_f^{(k)} + \frac{1 - X_f(w^{(k)})}{\nabla X_f(w^{(k)})} \end{cases} \quad (6)$$

经近似线性变化后的目标函数为 w 的一次线性函数,其满足约束条件的近似解为

$$w^{(k+1)} = \min(w_u^{(k)}, w_f^{(k)}) \quad (7)$$

将电力系统暂态稳定分析与近似线性规划算法相结合,对系统在某种运行方式下系统受到扰动后的风电场最大容量的求取步骤如下。

1) 系统未接入风电场时,对系统运行仿真,求得 $u_n(0)$ 、 $f_n(0)$, 且 $X_u(0) = X_f(0) = 0$ 。假设风电场最大容量近似解为 $w^{(1)}$ ($w^{(1)}$ 的值取一般为系统总负荷的 5%);

2) 系统接入风电场后,在某种扰动下,对系统进行暂态稳定分析,得到 $u_n(w^{(k)})$ 、 $f_n(w^{(k)})$, 通过式(3)到(7)求得 $X_u(w^{(k)})$ 、 $X_f(w^{(k)})$ 和 $w^{(k+1)}$;

3) 若 $X_u(w^{(k)}) > 1$ 或 $X_f(w^{(k)}) > 1$, 则令

$$\begin{cases} w^{(k+1)} = \frac{w^{(k)} + w^{(k+1)}}{2} \\ \Delta w^{(k)} = w^{(k+1)} - w^{(k)} \\ X_u(w^{(k)}) = X_u(w^{(k-1)}) \\ X_f(w^{(k)}) = X_f(w^{(k-1)}) \end{cases} \quad (8)$$

如果 $\Delta w^{(k)} < 1 \text{ MW}$, 停止迭代, 取上次迭代计算结果 $w^{(k)}$ 为最终解;

4) 如果 $X_u(w^{(k)}) = 1$ 且 $X_f(w^{(k)}) < 1$, 或 $X_f(w^{(k)}) = 1$ 且 $X_u(w^{(k)}) < 1$, 则 $w^{(k)}$ 为最终解;

5) 重复步骤 2)~4), 直到求得最终解。

3 算例分析

基于上述给出的模型和算法, 采用 EPRI-36 节点系统作为算例进行验证, 系统主接线图如图 1 所示。该系统除风电场外其余发电机发出的总有功率为 2 645 MW, 系统最大负荷为 2 568 MW, 功率基值为 100 MVA。在算例系统中, 风电场通过节点 33 接入系统, 假设风电场的初始容量占总负荷的 5% 左右, 即设风电场初始容量为 125 MW。

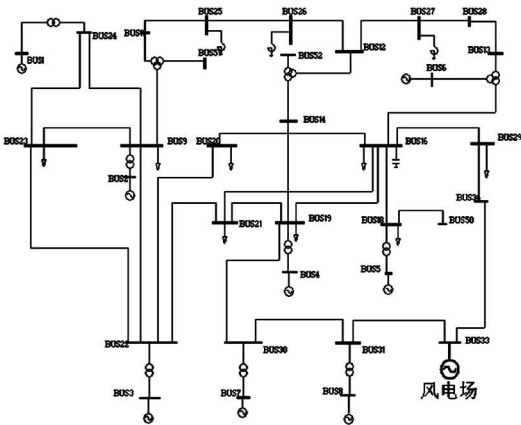


图 1 EPRI-36 节点系统主接线图

对系统而言, 在以下三种扰动方式下风电场的并网运行对系统运行的冲击最大, 只要在这三种暂态情况下能够保证系统稳定, 就可以保证系统在其他方式下也能稳定运行^[7]。

(1) N-1 故障。风电场由于故障与电网解列。

(2) 风速扰动 1。风速在短时间内由停机风速上升至额定风速。

(3) 风速扰动 2。风速在短时间内由额定风速下降至停机风速。

稳定判据:

(1) 对于系统发生故障的情况, 稳定判据为系统中发电机最大功角差第一摆和第二摆衰减振荡, 中枢节点电压恢复稳定。

(2) 风电场正常运行时风速是波动的, 因此系统各节点电压和频率也随之波动。当各节点暂态电压标幺值不低于 0.95, 不高于 1.1, 频率偏差在 ± 0.2

Hz 内时, 则为稳定运行。

计算工具采用电力系统分析综合程序 (PSASP), 风电场模型用 UD (用户自定义模型) 进行建模。将暂态稳定分析结果与近似线性规划算法求得的结果相结合, 通过仿真、分析、修正, 求得满足一定稳定约束的风电场容量的最大值, 进而得到风电场穿透功率极限。

(1) N-1 故障。在风电场运行时, 由于故障导致风电场与系统解列。故障时间为 1~10 s。在此种方式下的暂态稳定分析结果和优化结果如表 1 所示。

表 1 故障运行方式下的计算结果

仿真次数 /k	风电场容量 /MW	节点电压最小值 /p.u.	系统频率最小值 /p.u.	X_u	X_f	风电场容量修正值 /MW
0	0	0.978 88	1	0	0	125
1	125	0.967 11	0.997 42	0.407 5	0.645 0	193.8
2	193.8	0.961 42	0.996 73	0.604 6	0.817 5	266.51
3	266.51	0.957 85	0.996 27	0.728 2	0.932 5	309.23
4	308.33	0.956 46	0.996 07	0.776 3	0.982 5	324.745 4
5	322.74	0.955 60	0.996 03	0.805 4	0.992 5	335.81
6	337.15	0.955 10	0.996 00	0.822 2	1	

(2) 风速扰动 1。考虑到风速的扰动, 最极端的情况使风速在短时间内 (10 s), 由停机风速增至额定风速。此种方式下暂态稳定分析结果及优化结果如表 2 所示。

表 2 风速扰动 1 下的计算结果

仿真次数 /k	风电场容量 /MW	节点电压最大值 /p.u.	系统频率最大值 /p.u.	X_u	X_f	风电场容量修正值 /MW
0	0	1.039 10	1	0	0	125
1	125	1.051 30	1.002 55	0.200 3	0.637 5	196.08
2	196.08	1.052 70	1.003 74	0.223 3	0.935 0	211.61
3	211.61	1.052 90	1.003 93	0.226 6	0.982 5	213.88
4	217.79	1.052 96	1.003 96	0.233 1	0.99	216.90
5	225.93	1.053 73	1.004	0.240 3	1	

(3) 风速扰动 2。考虑到风速的扰动, 最极端的情况使风速在短时间内 (10 s), 由额定风速降至停机风速。此种方式下暂态稳定分析结果及优化结果如表 3 所示。

综合上述三种扰动方式下的暂态稳定分析结果及优化结果知, 当风电场通过节点 33 接入系统时, 风电场的最大容量为 216.90 MW。由式 (1) 得风电场穿透功率极限值为 8.5%。

将风电场分别通过节点 23、24、29 接入系统, 暂态稳定分析结果及优化结果如表 4 所示。

表 3 风速扰动 1 下的计算结果

仿真次数 /K	风电场容量 /MW	节点电压最小值 /p.u	系统频率最小值 /p.u	X_u	X_f	风电场容量修正值 /MW
0	0	0.978 88	1	0	0	125
1	125	0.966 67	0.997 84	0.422 8	0.540 0	231.48
2	231.48	0.965 19	0.996 86	0.474 0	0.785 0	324.92
3	324.92	0.960 44	0.996 38	0.638 5	0.905 5	398.18
4	398.18	0.954 00	0.996 09	0.857 7	0.977 5	421.07
5	421.07	0.953 30	0.996 05	0.883 2	0.987 5	421.10
6	421.10	0.9528 0	0.996 00	0.900 6	1	

表 4 不同系统接入点的计算结果

风电场接入节点	风电场容量 /MW			仿真迭代次数	风电场穿透功率极限
	故障运行	风速扰动	风速扰动 2		
23	142.78	237.65	221.09	5	5.56%
24	298.75	221.88	330.91	6	8.64%
29	229.32	323.48	401.09	5	8.93%

4 风电场穿透功率极限影响因素分析

通过上述三种方式的暂态仿真结果可以看出,在第 1、3 种扰动方式下,系统因失去大量有功功率,导致系统节点电压、频率降低;在第 2 种扰动方式下,系统因短时间内有功功率激增,导致系统节点电压、频率上升。通过优化计算可知,电压、频率上升的幅度,直接影响了风电场容量的值。因此,电压和频率对风电场穿透功率极限值有较大影响。

同时,在系统中风电场容量达到穿透功率极限时,多数情况下是系统的频率偏差达到界限。说明,系统频率的偏差是决定风电场穿透功率极限的主要因素。所以,为了能够充分利用风能,增加风电场容量,就需要采取措施,平缓风电场输出功率的变化,减小频率的波动。

当风电场接入节点选择不同时,风电场的最大容量也是不同的。由表 1~4 可以看出,当风电场接入系统节点离发电厂越近时,它的穿透功率极限越小。反之,越大。因此,风电场穿透功率极限与系统的网络结构也密切相关。

5 结 论

通过对常用两种求取风电场穿透功率极限方法

的分析,提出了一种基于近似线性规划和暂态稳定分析相结合的风电场穿透功率极限计算方法。将近似线性规划法与暂态稳定分析相结合,充分考虑了三种极端扰动方式下系统的风电场可接入容量。这种方法本质上是一种仿真、分析、修正交替进行的方法,避免了单纯暂态稳定分析繁琐的仿真过程,能够对每次风电场的取值进行精确的定位,从而能在较短的时间内得到满意的结果,并且保证了结果的最优性。

应用 PSASP 中自带的 EPRI-36 节点系统对该方法进行了验证,并对仿真优化结果进行了分析,总结了影响风电场穿透功率极限的几方面因素。

参考文献

- [1] 龚钟明. 从世界能源发展趋势探索未来中国能源战略(上) [J]. 能源战略, 2005, 25(3): 33-36.
- [2] 杨秀媛, 梁贵书. 风力发电的发展及其市场前景 [J]. 电网技术, 2003, 27(7): 78-79.
- [3] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29.
- [4] 陈树勇, 申洪, 张洋, 等. 基于遗传算法的风电场无功补偿及控制方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 1-6.
- [5] Schlueter R A, Park G. A Modified Unit Commitment and Generation Control for Utilities with Large Wind Generation Penetrations [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems 1985, 104(7): 1630-1636.
- [6] 郑国强, 鲍海, 陈树勇. 基于近似线性规划的风电场穿透功率极限优化的改进算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 68-71.
- [7] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算 [J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.

作者简介:

廖 萍 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作。

(收稿日期: 2010-03-29)