# 小型定速风力发电机对10 kV分布式配电网中静电电压稳定性的影响

随着新能源特别是风电能源的广泛应用，小规模风力发电机接入分布式电网的需求越来越多。接入量的增加使其对整个系统的影响不得不引起重视，例如电压分布和电压稳定性。对辐射型配电网中的静电电压稳定性进行了分析，对时变系统中的风电数据进行了长期监测和采集。通过对一个辐射型配电网进行评估，提出依靠风电机组的多目标电压波动抑制策略，在现有风电机组控制方式基础上，添加辅助电压波动抑制环节，通过快速控制接入点与电网的无功交换功率抑制电压波动。算例证明了所提策略可有效抑制 POI 和传输线路的电压波动。

王树军　刘　健　徐　硕　鲁　杰/国网冀北电力有限公司承德供电公司

王树军/高级工程师

关键词/Keywords
分布式发电·
定速风力发电机·
静电电压稳定性·
10 kV配电网·

## 0　引言

将分布式发电的电量并入到电网中，会对系统的很多运行特性造成影响，例如电压分布和电压稳定性[1-2]。但是随着新能源尤其是风电的广泛应用，把更多的分布式发电并入电网中是未来发展的趋势。最新的中小型风电和太阳能发电技术也使得这种方式成为可能[3-4]。

风力发电技术主要分为两类：定速型和变速型。在定速风电系统中，采用一种笼型感应式发电机。该发电机通过变压器直接连接到电网中。在变速风电系统中采用的是双馈型感应发电机连接一个小型电源转换器，或是采用一个永磁同步风力发电机连接一个常规电源转换器。目前大多数的大型风电场中采用的是变速风力发电机，但是在很多低电量的应用中，定速风力发电机也有很多优势，如发电成本低、操作简单、无刷结构以及无须维修[5]。

分布式风力发电机有很多优点，如提高电压质量、减少损耗、提高可靠性和容量释放等。电压稳定性决定了电能质量。

由于风力发电是随时间变化的，正是由于风力发电的这种随机性，能够保持电压的稳定从而进一步提高发电质量才能保证整个系统有足够的稳定性和可靠性。对于电压稳定性的衡量，可以从动态稳定性和静态稳定性两个方面进行[6]。对于静态稳定性主要研究网络的最大载荷能力，而动态稳定性主要分析电网的动态电压崩溃指标。在静态稳定性分析中，通常采用$P-V$曲线作为评估工具。而$P-V$曲线的绘制需要多个潮流计算值的计算结果，同时还有其他几种评估动态电压稳定性的方法，通常应用在高压输电系统中。对分布式风电系统的电压稳定性研究仍然处于起步阶段。

针对定速风力发电机在目前的分布式系统中的应用，本文提出了一种对静态电压稳定性进行直接评估的方法。该方法充分考虑了风电系统的时变性和随机性。

在方法验证部分，对厂家提供的风电涡轮机进行了模型化和数据分析，对定速风电机连接到一个改进的32节点的12.66 kV辐射型配电网进行评估。

## 1　电压稳定性指标

电压稳定性指标描述的是一个2总线系统，通过一个阻抗值为（$R+jX$）的电感，2总线系统如图1所示。



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

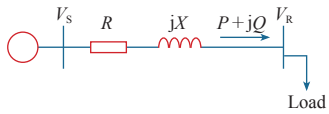


图1 简单2总线系统

则在这个复杂系统中流过接收端的电流可以表示为$P+\mathrm{j}Q$。用$V_S$和$V_R$分别表示发送端和接收端的电压幅值，则$V_S$和$V_R$之间的关系可表示为

$$\bar{V}_S=\bar{V}_R+\frac{(P-\mathrm{j}Q)}{\bar{V}_R^*}(R+\mathrm{j}X) \tag{1}$$

式（1）可以展开成如下形式

$$V_R^4+[2(RP+XQ)-V_S^2]V_R^4+(P^2+Q^2)(R^2+X^2)=0 \tag{2}$$

在满足电压稳定性的范围之内，式（2）中对于每个给定的$V_S$，$V_R$有两个正实根。根的值越大稳定性越高，相反值越小稳定性越差。用来描述负载电压稳定性的曲线就是$P-V$曲线。若要保证式（2）有两个正实根，则必须满足以下条件[10]

$$[2(RP+XQ)-V_S^2]^2-4(P^2+Q^2)(R^2+X^2)>0 \tag{3}$$

在电压稳定临界点，式（3）中左边的值就变为零。随着负荷的进一步提高，这个值会变为负数，从而使式（2）找不到一个正整数解。因此式（3）可以判定电压稳定的临界点，因此把它作为系统接收端总线的电压稳定指标系数。即

$$\mathrm{VSI}=[2(RP+XQ)-V_S^2]^2-4(P^2+Q^2)(R^2+X^2) \tag{4}$$

对于$V_S=1(\mathrm{pu})$，在无负荷情况下（$P=Q=0$）式（4）中的VSI的解只有单一根。即VSI在0和1之间变化，同时意味着在零负荷与满负荷（电压临界点）之间改变。利用式（4）对接收端总线的VSI进行评估需要以下4个值的计算：$V_S$、$V_R$、$P$和$Q$。这4个参数可以通过对负载电流的计算获得。一旦测得了负载电流，就可以利用式（4）计算出系统中所有的VSI值。其中VSI值的最小值被定义为整个系统的VSI值，而其对应的那条总线就是系统中最为脆弱的总线。

## 2 建模与算例分析

风能转换系统主要由风力涡轮机和发电机两部分组成。首先对定速风力发电进行建模。

### 2.1 风力涡轮机建模

涡轮机负责把空气动能转化成机械能。涡轮机所捕获的机械能（$P_m$）计算公式为

$$P_m=\frac{1}{2}\rho A V_w^3 C_P(\lambda,\beta) \tag{5}$$

式中，$\rho$为空气密度；$V_w$为风速；$A$为扫掠面积；$C_P$为性能系数，它是由叶片端速率$\lambda$和桨叶角$\beta$来决定的。

大多数风力涡轮机厂商提供的功率数据都是根据风速变化的。

在本案例中，采供的是GWL 225 kW涡轮发电机。其功率值如表1所示。切入风速（$V_{in}$）是4 m/s，切出风速（$V_{out}$）是25 m/s。如果风速小于$V_{in}$或者大于$V_{out}$，则功率$P_m$为零。

表1 225 kW涡轮发电机功率数据

| $V_w$/(m/s) | $P_m$/kW | $V_w$/(m/s) | $P_m$/kW |
|---|---|---|---|
| 4 | 9 | 15 | 230 |
| 5 | 19.5 | 16 | 234 |
| 6 | 32.8 | 17 | 230 |
| 7 | 58.8 | 18 | 229 |
| 8 | 87.6 | 19 | 225 |
| 9 | 118.7 | 20 | 215 |
| 10 | 149.6 | 21 | 212 |
| 11 | 171.4 | 22 | 210 |
| 12 | 189.3 | 23 | 210 |
| 13 | 206 | 24 | 210 |
| 14 | 217 | 25 | 210 |

### 2.2 风电机组控制方式对电压波动的影响

为了研究电压波动产生的原理及风电机组控制方式对电压波动的影响，建立如图2所示辐射型配电网网架进行仿真分析。通过DIgSILENT Power Factory软件建立配电网模型进行方法验证。

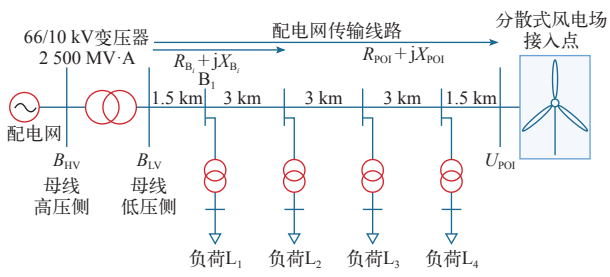


图2 分散式风电场的中压配电网网架拓扑



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分散式风电场由4台1.5 MW双馈风电机组组成，通过12 km馈线连接到10/66 kV变电站低压侧。在传输线路上T接有4组负荷，并由变压器降压到市电，负荷1、2、3和4分别为1 MW、2 MW、3 MW和5 MW，配电网馈线中分散式风电可以满足部分负荷用电需求，但上级电网仍需馈线传输其余负荷电能。本文将短时间闪变$P_{st}$作为衡量电压波动的参数，利用电压变动近似分析风电机组输入风速幅值、湍流、电网阻抗角、短路容量比和控制方式对电压波动的影响。

根据风速和电网条件对电压波动的影响规律的分析，选取最好和最坏两种情景测试抑制效果，具体参数如表2所示。

表2 两种情景参数

| | 情景1 | 情景2 |
|---|---|---|
| 平均风速/(m/s) | 8 | 12 |
| 湍流强度 | 0.05 | 0.15 |
| 短路比 | 115 | 15 |
| 阻抗比 | 1 | 0.58 |

由分析结果可见恒电压控制对电压波动抑制效果最明显，因此仅对恒无功和恒功率因数两种多目标控制方法进行仿真分析，仿真结果如表3所示。

表3 短时间闪变值$P_{st}$

| | | 情景1 | 情景2 |
|---|---|---|---|
| 单独控制 | 恒无功 | 0.14 | 0.18 |
| | 恒功率因数 | 0.58 | 0.54 |
| 多目标控制 | 恒无功 | 0.08 | 0.36 |
| | 恒功率因数 | 0.04 | 0.41 |

由表3可以看出：两种控制方式下第二种情景的$P_{st}$均明显大于第一种情景，说明对于电压等级低、电网相对薄弱的配电网，分散式风电场POI电压波动程度受风速和电网条件影响较大；采用多目标控制比单独控制明显减小了POI的$P_{st}$。情景1中，多目标控制下恒无功和恒功率因数控制比单独控制$P_{st}$分别减小了42.86%和50%；情景2中$P_{st}$分别减小了37.93%和24.07%，证明了所提策略的有效性。情景2两种多目标控制虽然大幅降低了$P_{st}$，但$P_{st}$仍大于0.35（IEC标准要求），这是由于变流器的限制，无功功率达到机组输出极限，因此建议无功功率设定参考值应小于风电机组无功功率输出极限。

## 3 结束语

定速风力发电接入分布式系统以后，会显著改变系统的电压特性和系统的电压稳定性。本文分析了定速风力发电对静电电压的影响。分析中，基于风电系统的风速和时变负载数据，提出了一种对电压稳定性进行评估的直接方法VSI。涡轮机的功率通过对风力数据的测定和厂商提供的数据进行确定，然后通过计算，把涡轮机功率引入到等效电路中。所构造的仿真模型在32总线的分布式风力发电系统中进行了测试。实验结果表明，VSI随着风电的变化有显著变化，然而VSI的平均值却单向提高了，尤其是在网络最脆弱的位置。综上所述，VSI的提高与发电机大小、位置以及发电机的无功功率支持都有关。

参考文献

[1] 王成山，李鹏．分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战 [J]．电力系统自动化，2010，34 (2)：10-14．

[2] 季阳，艾芊，解大．分布式发电技术与智能电网技术的协同发展趋势 [J]．电网技术，2010，34 (12)：15-23．

[3] 刘吉臻．大规模新能源电力安全高效利用基础问题 [D]．北京：华北电力大学，2012．

[4] 汪洋，卢继平，李文沅，等．基于局部网络电压向量的等值模型及其电压稳定性指标 [J]．中国电机工程学报，2008，28 (34)：52-58．

[5] 王俊，蔡兴国，季峰，等．考虑新能源发电不确定性的可用输电能力风险效益评估 [J]．电力系统自动化，2012，36 (14)：108-112．

[6] 徐晓菲，牟涛，贾琳，等．大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制 [J]．电力系统自动化，2014，38 (9)：15-19．

（收稿日期：2016－03－15）EA



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net