

# 风电场接入系统谐波叠加计算方法的研究

姚龙华

(江苏省电力公司检修分公司南京分部,江苏 南京 210019)

**摘要:**风电接入系统会产生谐波污染,对于大规模集中式风电场,须考虑其谐波所产生的叠加效应。文中先对风电场谐波产生原因进行了分析,再结合工程实例,讨论两种叠加算法所计算得到的电网公共连接(PCC)点处的谐波电流大小,且能更好地为建设风电场提供可靠依据。

**关键词:**风力发电;谐波;叠加效应

**中图分类号:**TM614

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2012)02-0022-04

风能是一种取之不尽又清洁无污染的可再生能源。我国风电装机容量速度很快,以每年20%以上的速度递增。随着风电场的容量越来越大,对系统的影响也越来越明显,所产生的谐波污染问题是电力系统较为关注的电能质量问题<sup>[1]</sup>。谐波分析包括谐波源分析和电力系统谐波分析<sup>[2]</sup>。在电力电子装置普及以前,变压器是主要的谐波源。随着电力电子技术的迅速发展,新型的变速风力发电机组由于采用了大容量的电力入电网运行时会使电网中出现谐波电子设备,造成电力系统谐波污染,对电力系统的安全、稳定、经济运行构成潜在威胁,同时也阻碍了电力电子技术的发展<sup>[3]</sup>。如果在风电场接入电网后才发现其谐波污染达不到控制要求,投运后的升级改造工作将不得不付出很大的代价。因此,在工程设计阶段应尽可能实际地分析预期风电场接入后所造成的谐波污染,这就成为风电场设计过程中一个重要课题。

文献[1]简化风电机组模型,在此基础上计算风电场并网连接公共点的谐波大小。文献[2]利用C语言编写了谐波潮流计算程序,得到结果与国家规定标准进行比较;上述文献都没能考虑风电场之间的叠加效应。因此,本文对风电场叠加效应的计算方法进行了研究,以评估大型风电场并网所产生的谐波大小。

## 1 风电场谐波源分析

### 1.1 风电机组类型产生的谐波

风力发电系统主要有恒速恒频风力发电系统和变速恒频风力发电系统两大类。对于恒速风力发电机组,由于在持续运行过程中没有电力电阻元件参与,因此没有谐波电流。变速恒频双馈风力

发电机系统可忽略发电机本身产生的谐波。当风电机组投入工作时,软并网装置处于工作状态,会产生部分谐波电流,但由于投入过程持续的时间很短,注入的谐波电流基本可以忽略<sup>[4]</sup>。

### 1.2 电力电子换流设备产生的谐波

谐波电流的真正来源是风电机组中的电力电子元件。变速恒频风电机组的变流器始终处于工作状态,谐波电流大小与输出功率基本呈线性关系,也就是与风速大小有关。在正常状态下,谐波干扰的程度取决于变流器装置的设计结构及其安装的滤波装置状况,同时与电网的短路容量有关。因此,风机场的谐波主要来源于转子与电网相连部分之间的一组转换器,变流器包括一对背靠背的交直流变换装置(分别为转子侧变流器、网侧变流器),网侧变流器通过风电场升压变向电网注入谐波电流。目前集中式大型风电场均集中接入了数十至数百台风力发电机组,为了实际计算评估所有风机产生的谐波电流的集合效应,需将整个风电场等效为一个集中谐波源,以参与全网的谐波估算<sup>[5,6]</sup>。

本文主要对风电场多源谐波集合效应进行计算,并对其结果进行分析。第一种方法基于IEC 61400-21叠加算法,第二种方法基于更加复杂精确的模型,使该方法能够适用于计算更高次谐波在电网接入点及周边引起的电压波形畸变。

## 2 谐波叠加 IEC 61400-21 方法

IEC 61400-21 以及 IEC 61000-3-6 均确认了谐波的叠加不应使用代数和的方法,并提供了两种适用性不同的叠加原则<sup>[7,8]</sup>。IEC 61400-21 中规定,风电机组注入电网接入点的谐波电流可以近似地用下式来等效:

$$I_{h\Sigma} = \beta \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{tr}} \left( \frac{I_{h,i}}{n_i} \right)^\beta} \quad (1)$$

式(1)中: $I_{h\Sigma}$ 为风电机群注入电网的总谐波电流畸变; $N_{WT}$ 为风机个数; $I_{h,i}$ 为第*i*台风机注入的第*h*次谐波电流畸变; $n_i$ 为从第*i*台风机到电网接入点路径上的变压器总变比; $\beta$ 为修正系数,修正系数如表1所示。

表1 谐波叠加修正系数

| 谐波次数               | $\beta$ |
|--------------------|---------|
| $h < 5$            | 1.0     |
| $5 \leq h \leq 10$ | 1.4     |
| $h > 10$           | 2.0     |

由于 IEC 61400-21 中规定的叠加原则,其事实上更多地考虑了特征谐波尤其是低次谐波的相位相关性,对于几乎没有相位相关性的非特征谐波,尤其是低次谐波,若也采用此法,必然会带来不符合实际的偏差。

### 3 谐波叠加计算的 Rayleigh 方法

#### 3.1 Rayleigh 电流等效法

实际工程中需要确保风电场的谐波注入所造成的电网接入点和周边的电压波形畸变在可容忍的范围内。因此设计人员估算由风电谐波源产生的电压波形畸变时通常需要首先估算出风场谐波源注入接入点的总谐波电流的幅值。

由文献[4]可得注入接入点的某一第*h*次谐波电流幅值:

$$\sigma_{\Sigma,h} = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2)$$

式(2)中: $X, Y$ 为总谐波电流的实部和虚部。

如上所述, $X, Y$ 均近似服从正态分布  $N(0, \sigma_{\Sigma,h}^2)$ , 他们的正交向量和,即第*h*次总谐波电流的幅值服从 Rayleigh 分布。

因为风电场注入接入点的某一第*h*次谐波电流幅值服从 Rayleigh 分布,可以根据相应的 Rayleigh 累积分布函数,对实际可能出现的谐波电流,以及其造成的电压波形畸变进行估算。即为 Rayleigh 电流等效法。

#### 3.2 Rayleigh 电压等效法

Rayleigh 电压等效法考虑了每一单台风电机组所注入的谐波电流所对风电场接入点的谐波电压的影响。对于每一单次谐波*h*,电网任意一个节点的谐波电压  $U_h$  皆是各谐波源注入电网的*h*次谐波电流  $I_{h,i}$  的线性函数。因此接入点的*h*次谐波电压:

$$\bar{U}_{h,pcc} = \sum_{j=1}^{N_{WT}} \bar{Z}_{h,pcc-j} \times \bar{I}_{h,j} \quad (3)$$

式(3)中: $\bar{Z}_{h,pcc-j}$ 为第*j*台风机出口与接入点之间的

互阻抗,上划线表示此参数均为复数量。

如果只关心*h*次谐波电压的实部,则:

$$\text{Re}\{\bar{U}_{h,pcc}\} = \sum_{j=1}^{N_{WT}} \bar{Z}_{h,pcc-j} \times \bar{I}_{h,j} \times \cos(\arg \bar{Z}_{h,pcc-j} + \arg \bar{I}_{h,j}) \quad (4)$$

因为不同风机所对应的  $\bar{Z}_{h,pcc-j}$  的模是不一样的,因此式(4)中各个单项可能的最大值并不一致。但這些随机量序列的和仍然收敛为一个正态分布,其标准差为:

$$S_n = \frac{I_h}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{WT}} |\bar{Z}_{h,pcc-j}|^2} \quad (5)$$

则接入点的单次谐波电压  $U_h$  服从 Rayleigh 分布,且标准差  $\sigma$  即为式(5)中的  $S_n$ 。其*p*%幅值为:

$$U_{\Sigma,pcc,h,p} = \sqrt{-2S_n^2 \ln(1-p)} \quad (6)$$

Rayleigh 电压等效法的应用与前一节的电流等效法类似,但在求取标准差  $S_n$  的过程中,需要先求取*h*次谐波频率下每一单台风机与接入点之间的互阻抗  $\bar{Z}_{h,pcc-j}$ 。

## 4 算例分析

### 4.1 计算内容

针对湖南太平里风能电站谐波发生情况,接入系统示意图如图1所示。

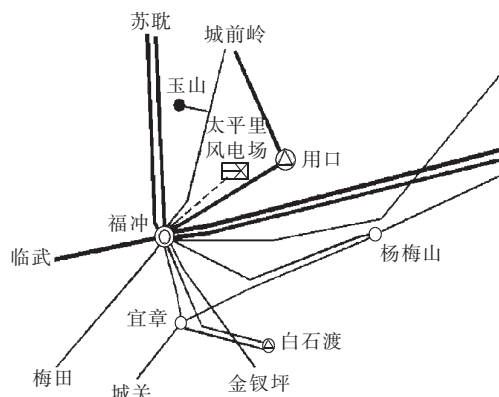


图1 太平里风电场接入系统示意图

考虑该风电站向电网注入的谐波电流及谐波电压在电网公共连接(PCC)产生的谐波电压是否在国标限值内。谐波电流及谐波电压的允许值在 GB/T 14549-93《电能质量 公用电网谐波》有明确规定,因此,本文在计算两种不同叠加方法下,风电场谐波电流发生量及该谐波电流在 PCC 点产生的谐波电压,将之与国标进行比较就可以判定谐波是否超标,以及不同方法计算得出的结果,以供参考<sup>[9]</sup>。

### 4.2 谐波电流和谐波接入及限制

(1) PCC 点:根据接入系统方案,则 PCC 点为福冲 220 kV 变 110 kV 侧母线。

(2) 福冲 220 kV 变 110 kV 侧母线短路容量: 在系统小方式中计算得到的最小短路容量为 2 808.87 MV·A。

(3) 谐波电流限值, 实际变电站谐波电流允许值按系统实际的最小短路容量进行换算, 即:

$$I_h = (S_{k1}/S_{k2}) I_{hp} \quad (7)$$

式(7)中:  $S_{k1}$  为 PCC 点的最小短路容量, MV·A;  $S_{k2}$  为基准短路容量, MV·A;  $I_{hp}$  为基准短路容量对应第  $h$  次谐波电流允许值, A;  $I_h$  为短路容量是  $S_{k1}$  时的第  $h$  次谐波电流允许值, A。

通过上式计算得出福冲变电站 110 kV 母线总谐波电流限值, 如表 2 所示。

表 2 福冲变电站 110 kV 母线总谐波电流限值 A

| 谐波次数 | 限值    | 谐波次数 | 限值   |
|------|-------|------|------|
| 2    | 44.9  | 14   | 6.37 |
| 3    | 35.9  | 15   | 7.12 |
| 4    | 22.4  | 16   | 5.62 |
| 5    | 35.9  | 17   | 10.5 |
| 6    | 14.9  | 18   | 4.87 |
| 7    | 25.4  | 19   | 9.36 |
| 8    | 11.24 | 20   | 4.49 |
| 9    | 11.98 | 21   | 5.24 |
| 10   | 8.99  | 22   | 4.12 |
| 11   | 16.1  | 23   | 7.86 |
| 12   | 7.49  | 24   | 3.75 |
| 13   | 13.8  | 25   | 7.12 |

对应的风电站专用变允许注入系统主供变电站(福冲变电站)的各谐波电流允许值:

$$I_{hi} = I_h (S_i/S_T)^{1/\alpha} \quad (8)$$

式(8)中:  $S_i$  为太平里风电站专用变用户的用电协议容量, MV·A;  $S_T$  为 PCC 点南大 110 kV 母线的总供电容量, MV·A;  $I_{hi}$  为太平里风电站专用变用户对应第  $h$  次谐波电流允许值, A;  $\alpha$  为相位叠加系数。相位叠加系数<sup>[9]</sup>如表 3 所示。

表 3 相位叠加系数

| 谐波次数     | 3   | 5   | 7   | 9 | 11  | 13  | >13 或者偶次 |
|----------|-----|-----|-----|---|-----|-----|----------|
| $\alpha$ | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 2 | 1.8 | 1.9 | 2        |

计算福冲变 110 kV 母线总供电容量时, 以福冲变 110 kV 变的主变容量进行考虑。其中太平里风电站专用变用户的用电协议容量: 50 MV·A; 福冲变总的供电容量: 福冲主变 2×120 MV·A+太平里风电站专用变 50 MV·A+宜章主变 63 MV·A+杨梅山 30 MV·A+白石渡 63 MV·A=446 MV·A。则计算得太平里风电站专用变注入福冲变谐波电流限值, 如表

4 所示。

表 4 太平里风电站专用变注入南大变谐波电流限值 A

| 谐波次数 | 限值  | 谐波次数 | 限值  |
|------|-----|------|-----|
| 2    | 1.5 | 14   | 2.1 |
| 3    | 4.9 | 15   | 2.4 |
| 4    | 7.5 | 16   | 1.9 |
| 5    | 5.8 | 17   | 3.5 |
| 6    | 5.0 | 18   | 1.6 |
| 7    | 5.3 | 19   | 3.1 |
| 8    | 3.8 | 20   | 1.5 |
| 9    | 4.0 | 21   | 1.7 |
| 10   | 3.0 | 22   | 1.4 |
| 11   | 4.8 | 23   | 2.6 |
| 12   | 2.5 | 24   | 1.3 |
| 13   | 4.4 | 25   | 2.4 |

### 4.3 谐波计算

#### 4.3.1 系统等值

在建立计算网络过程中, 考虑系统的规模, 需要对系统进行等值。在计算过程中以福冲变 220 kV 母线为系统等值点, 福冲变 220 kV 母线与系统的连接用一个等效电网等值, 该等效电网的短路容量用最小短路容量进行赋值。对应福冲变 220 kV 母线最小短路容量  $Sd1=6 700.57$  MV·A, 则等效电网短路容量  $Sd2=Sd1=6 700.57$  MV·A。

#### 4.3.2 谐波计算

全部风机满出力运行时, 风电场注入福冲变 110 kV 母线谐波电流。

(1) 由 IEC 61400-21 方法, 计算出的结果如表 5 所示。

表 5 IEC 61400-21 计算福冲变谐波电流 A

| 谐波次数 | 计算值     | 谐波次数 | 计算值     |
|------|---------|------|---------|
| 2    | 0.432 6 | 11   | 0.018 4 |
| 4    | 0.255 9 | 13   | 0.003 1 |
| 5    | 0.531 7 | 14   | 0.003 1 |
| 7    | 0.132 6 | 17   | 0.003 1 |
| 8    | 0.031 8 | 19   | 0.003 1 |
| 10   | 0.042 2 | 23   | 0.003 1 |

(2) 由 Rayleigh 电流等效法计算所得福冲变 110 kV 母线谐波电流大小, 如表 6 所示。

表 6 福冲变 110 kV 母线谐波电流 A

| 谐波次数 | 计算值   | 谐波次数 | 计算值   |
|------|-------|------|-------|
| 2    | 0.395 | 11   | 0.237 |
| 4    | 0.158 | 13   | 0.079 |
| 5    | 2.291 | 14   | 0.079 |
| 7    | 0.316 | 17   | 0.079 |
| 8    | 0.079 | 19   | 0.079 |
| 10   | 0.079 | 23   | 0.079 |

由表 5、表 6 看出,在工程设计阶段的谐波研究中,尤其是非特征谐波的研究,需考虑多个谐波源之间的相位分布所产生的抵消效应。该风电场发射的特征谐波主要以 5 次谐波电流为主。而 IEC 61400-21 所推荐的方法夸大了较低次谐波的值,相对较高次部分结果又被低估了。

## 5 结束语

(1) 对实际工程进行计算时,谐波以 5 次谐波电流为主,则风电场配置的无功补偿装置 SVC 其电容器组设计时需考虑对 5 次谐波的滤波作用,以防止谐振。

(2) 风电场内的非特征谐波的相关性则很弱。传统的保守估计在建模时假定所有风机产生的谐波都是同相的,由此得出的整个风场的集合效应远远大于实测结果。IEC 61400-21 所建议方法的使用应慎重考虑其适应性。Rayleigh 等效方法在风电场接入系统的工程设计中实际应用,其合理性与有效性在含风电场谐波计算中得到了验证,大幅压缩了传统方法下的谐波计算结果不确定性。

### 参考文献:

[1] 白鸿斌,王瑞红,王真,等.风电场接入电网的电能质量分析方法研究及案例分析[J].东北电力大学学报,2008,28(6).

- [2] 韩肖清,张健,张友民,等.风电场谐波分析与计算[J].太原理工大学学报,2009,40(5).
- [3] 高玉洁.风电场接入电网后的电能质量问题分析[J].南方电网技术,2009,03(4).
- [4] 陆一川,尹凡.使用大型风力发电站的多元非特征谐波的叠加效应算法[J].华东电力,2010,38(9).
- [5] WANG L, CHEN S S. Excitation Capacitors on Harm onic-Current Amplification of Self-Excited Wind Induction Generators [C].Power Systems Conference and Exposition,Vol.2, 10-13 Oct.2004:802-806.
- [6] PAPATHANASSIOU S A, PAPADOPOULOS M P.Harmonic Analysis in a Power System with Wind Generation [C]. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 21 Oct.2006: 2006-2016.
- [7] Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines [S].IEC Standard 61400-21, Ed2.0, Aug,2008.
- [8] Assessment of Emission Limits for the Connection of Distorting Installations to MV, HV and EHV power systems [S].IEC Standard 61000-3-6, Ed. 2.0, Feb.2008.
- [9] GB/T 14549-93,电能质量公用电网谐波[S].

### 作者简介:

姚龙华(1984),男,安徽庐江人,工程师,从事电力系统输变电设备检修方面工作。

## Study on Calculation Method of Harmonic Superposition with Wind Power Integration with Power System

YAO Long-hua

(Nanjing Branch of Maintenance Company of Jiangsu Electric Power Company,Nanjing 210019, China)

**Abstract:** Harmonic pollution will be generated when wind power is integrated to power system. For large-scale centralized wind farm, superposition effect generated by harmonic must be considered. This paper analyzed cause of harmonic generated by wind power. Combined with project cases, harmonic current of power grid common connection point were calculated by two kinds of superposition algorithm. It can provide a reliable basis for the construction of wind power.

**Key words:** wind Power; harmonics; superposition effect

## 页岩气或成第二大能源

国家能源局局长刘铁男近日表示,《页岩气勘探开发“十二五”规划》已完成部门会签,即将对外公布,“十二五”期间,国家页岩气发展战略主要定位于勘探开发,“十三五”期间才有望实现规模化开采。

此前,国土资源部发布《全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选》初步评价,中国陆域页岩气地质资源潜力为 134.42 万亿  $m^3$ ,可采资源潜力为 25.08 万亿  $m^3$ (不含青藏区)。这是中国第一次系统评估页岩气资源。25.08 万亿  $m^3$ ,也使中国超过了目前全球第一大页岩气生产国美国的储量。美国能源情报署(EIA)《2011 年全球页岩气资源初步评估》报告称,美国拥有可采资源 24.41 万亿  $m^3$ 。

页岩气是指赋存于富有机质泥页岩及其夹层中,以吸附和游离状态为主要存在方式的烃类气体,页岩气化学成分主要为甲烷,一般含量在 85%以上,最高达到 99.8%,另外还含有少量的乙烷、丙烷和丁烷等。与煤层气相比,页岩气藏生产过程中无需排水,生产周期长,一般 30~50 年,勘探开发成功率高,具有较高的工业经济价值。

分析人士认为,无论从能源安全、能源结构合理化还是节能减排、降低污染的角度来说,未来提高天然气在能源消耗中的占比都是一条必由之路,页岩气作为天然气的一种,是非常规天然气的重要组成部分,“十二五”期间页岩气的发展将是领跑能源行业,由此将带来一系列的产业机会。