

风力发电系统谐波仿真计算

赵书强, 律方成, 李长青
(华北电力大学, 河北保定, 071003)

摘 要: 变速恒频风力发电机采用了换流装置, 运行时将产生较大的谐波电流, 由于谐波会对电网和风电系统产生一系列不利影响或危害, 因此, 对风电系统的谐波状况进行分析和计算是十分必要的。本文建立了风力发电系统谐波仿真计算的数学模型, 并针对具体算例进行了谐波仿真计算, 根据计算结果提出了采用三种风力发电机相互组合抑制谐波的方案。

关键词: 风力发电, 电力系统, 谐波、模型

0 引言

能源和环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。作为取之不竭的、洁净的可再生的能源, 很多新能源的应用越来越受到许多国家的关注, 而风力发电是新能源中开发最早, 应用较广, 技术最成熟的一种新能源。随着风力发电技术的成熟, 使制造成本不断下降, 发电成本也逐年下降, 加上各国政府的政策扶植, 风力发电从可再生清洁能源中脱颖而出, 成为最具工业开发价值的一种新能源。

由于风力发电有着其自身的结构和特点, 所以在大量接入电力系统前需要对其各方面的特性进行研究, 包括风力发电的功率特性对电力系统的电压和频率的影响、风力发电对电力系统经济运行的影响、风力发电对电力系统运行稳定性的影响等。其中, 在风力发电机中, 大量采用了具有变频功能的所谓变速恒频风力发电机, 这种风力发电机采用了交—直—交电力变频装置, 运行时将产生大量谐波电流, 这些谐波电流注入电力系统后, 会引起电网电压畸变, 不但降低了电能质量, 还会造成继电保护、自动装置误动, 影响到电力系统安全运行。另一方面, 过大的谐波分量也会给风力发电系统本身造成不利影响, 如使风力发电机过分发热而引起寿命降低、使风力发电的控制装置失灵等。所以, 当风力发电系统中具有较多的变速恒频风力发电机时, 必须采取必要的措施, 抑制风力发电系统谐波含量, 使其保持在一个安全的水平下。

本文分析了变速恒频风力发电机的谐波特性, 建立了适用于风力发电系统谐波仿真计算的各元件数学模型, 给出了风力发电系统谐波计算方法, 编制了相应的仿真计算程序, 并针对具体算例进行了谐波计算, 根据计算结果提出了采用三种风力发电方式相互组合来抑制谐波的方案, 即: 在同一风力发电场中, 尽量避免采用单一的变速恒频风力发电机, 而且不同类型的风力发电机要合理配置和接线。

1 变速恒频风力发电机的谐波特性

这种系统中的变速恒频控制策略在定子电路中实现, 系统示意图见图 1。由于风速的不断变化, 风力机和发电机也随之变速旋转, 产生频率不断变化的电功率。发电机发出的频率变化的交流电首先通过三相桥式整流器变成直流电, 再通过逆变器变换为频率恒定的交流电输入电网。

在此系统中可以采用的发电机有同步发电机、笼型发电机、绕线型发电机和永磁发电机。如果采用永磁发电机, 则可做到风力机与发电机的直接耦合, 省去变速箱, 由此可以提高可靠性, 减小系统噪声, 降低维护成本。

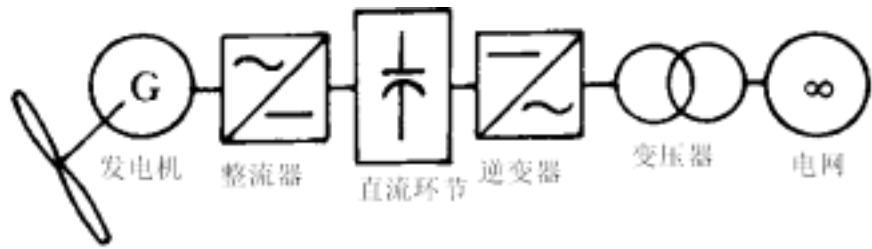


图 1 接入电网的交流/直流/交流发电机系统

这种系统在并网时没有电流冲击，不存在同期并网问题，但由于整流器和逆变器均为非线性电路，运行时将有谐波电流注入系统。

风力发电系统的整流器和逆变器分别采用三相 6 脉动整流桥或逆变桥，整流桥和逆变桥可统称为换流桥，它们产生谐波的机理是一样的。通过整流过程分析可知，三相 6 脉动换流桥产生的特征谐波电流次数为

$$h=6K \pm 1, K=1, 2, 3, \dots$$

即三相 6 脉动换流桥产生 5、7、11、13 等奇次谐波电流，其中以 5、7 次谐波电流为主。

三相换流桥详细的整流过程分析与供电电流表达式是非常复杂的，从实用谐波计算的角度看，详细的谐波源模型并不是必须。所以，在进行整流负荷谐波分析时，可以只考虑影响谐波的主要因素（如换相重叠角和可控硅触发角等），而忽略影响谐波的次要因素。这样，整流桥的谐波电流可按式计算

$$\frac{I_h}{I_1} = \frac{2}{h} \sqrt{\frac{\frac{\sin^2\left[(h+1)\frac{\gamma}{2}\right]}{(h+1)^2} + \frac{\sin^2\left[(h-1)\frac{\gamma}{2}\right]}{(h-1)^2} - \frac{2\sin\left[(h+1)\frac{\gamma}{2}\right]\sin\left[(h-1)\frac{\gamma}{2}\right]\cos(2\alpha + \gamma)}{(h+1)(h-1)}}{\sin^2(2\alpha + \gamma)\sin^2\gamma + [\gamma - \cos(2\alpha + \gamma)\sin\gamma]^2}} \quad (1)$$

式中 I_h —— h 次谐波电流；

I_1 —— 基波电流；

—— 可控硅触发角；

γ —— 换相重叠角。

式（1）中触发角 在计算时为给定值，换相重叠角 γ 按下式求解

$$\gamma = \cos^{-1}\left[\cos\alpha - \frac{2I_d X_s}{\sqrt{6}U}\right] - \alpha \quad (2)$$

式中 I_d —— 换流桥直流侧电流；

X_s —— 电源（系统）电抗；

U —— 电源（系统）相电压；

2 风力发电系统谐波仿真计算的数学模型

2.1 系统元件谐波模型

2.1.1 输电线

风力发电系统中的输电线距离较短，而且谐波计算考虑的次数较低，因而可以忽略输电线的对地电容、相间电容和电导，这样输电线的谐波模型可以采用 R—X 串联电路，如图 2 所示。图中， R_h 、 X_h 分别为输电线的谐波电阻和谐波电抗。

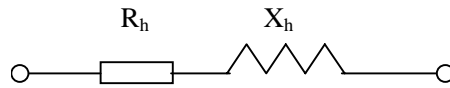


图 2 输电线谐波等值电路

在谐波情况下，输电线电感不发生变化，因而其谐波电抗与谐波次数成正比，而输电线谐波电阻则由于集肤效应的存在与谐波次数成某种特定关系。工程中输电线的单位长度谐波阻抗按下式计算

$$Z_{h1} = R_{h1} + jX_{h1} = (0.288R_1 + 0.138\sqrt{hR_1}) + jhX_1 \quad (3)$$

式中 Z_{h1} ——输电线每公里 h 次谐波阻抗；

R_{h1} ——输电线每公里 h 次谐波电阻；

X_{h1} ——输电线每公里 h 次谐波电抗；

R_1 ——输电线每公里基波电阻；

X_1 ——输电线每公里基波电抗。

2.1.2 变压器

当谐波次数不是很高时，变压器的匝间电容和对地电容可以忽略，如果再忽略变压器的励磁支路，则变压器的谐波等值电路也可以用图 2 所示的 R—X 串联支路，其中变压器电抗的处理与输电线一样，而变压器绕组电阻的处理则与输电线不同。一般变压器的谐波阻抗可按下式计算

$$Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th} = \sqrt{h}R_1 + jhX_{T1} \quad (4)$$

式中 Z_{Th} ——变压器 h 次谐波阻抗；

R_{Th} ——变压器 h 次谐波电阻；

X_{Th} ——变压器 h 次谐波电抗；

R_{T1} ——变压器基波电阻；

X_{T1} ——变压器基波电抗。

2.1.3 同步与异步风力发电机

谐波电流流入同步风力发电机时，由于谐波产生的电枢反应磁通转速高于同步速，与转子之间将产生相对运动，并引起一系列的电磁反应，这一系列的电磁反应非常类似于负序电流流入发电机后产生的电磁反应，因此，在谐波情况下，同步风力发电机可以用一接地的阻抗支路来等值，其阻抗值即为发电机的负序电抗与谐波次数的乘积。

对于异步风力发电机，和同步风力发电机类似，也可以用一接地的阻抗支路来等值，其阻抗值为异步发电机的负序电抗与谐波次数的乘积。

2.1.4 系统等值

计算风电系统谐波时，要对系统进行等值处理，一般可按串联谐波阻抗对系统进行等值，如图 3 所示。

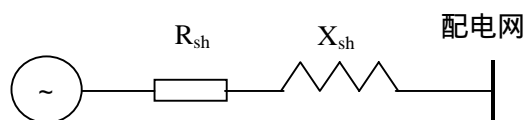


图 3 电力系统等值电路

系统等值谐波电阻和电抗有三种确定方法：

- (1) 通过实测确定；
- (2) 通过对系统进行谐波阻抗计算确定；
- (3) 根据短路容量确定。

一般来说，通过实测或对系统进行谐波阻抗计算可以获得较为准确的系统等值谐波阻抗，但受条件限制有时难以获得。根据短路容量进行计算简单易行，是谐波计算较常采用的方法，本文也采用这种方法。

2.2 谐波计算方法

本文从实用的角度出发，把基波潮流计算与谐波潮流计算分开进行，即先进行基波潮流计算，待基波潮流计算完毕后，根据已知的基波有关数据，再计算谐波潮流，二者基本上是独立进行的。这种方法不要求详细的谐波源模型，适合于工程谐波计算与仿真的需要。

变速恒频风力发电机可作为谐波电流源处理，在基波潮流计算完成后，谐波潮流计算的基本任务就是解如下的节点电压方程

$$\dot{\mathbf{I}}_h = \mathbf{Y}_h \dot{\mathbf{U}}_h \quad (5)$$

式中 $\dot{\mathbf{I}}_h$ —— h 次节点谐波电流注入列向量；

\mathbf{Y}_h —— h 次节点谐波导纳矩阵；

$\dot{\mathbf{U}}_h$ —— h 次节点谐波电压。

(5) 式是一个线性方程组，在形成系统的谐波导纳矩阵后，如果已知谐波源节点的谐波注入电流，则通过高斯主元素消去法解线性方程，即可得出各节点谐波电压，进而计算出各支路谐波电流，再进一步计算节点谐波电压总畸变率和支路电流百分含量等。

3 算例与结果分析

谐波仿真计算采用图 4 所示的风电系统，系统有三条 10KV 线路，分别连接处于不同地点的风力发电机，风力发电机按 18 台考虑，其中变速恒频风力发电机、同步风力发电机、异步风力发电机各为 6 台，每条 10KV 线路上接 6 台风力发电机。

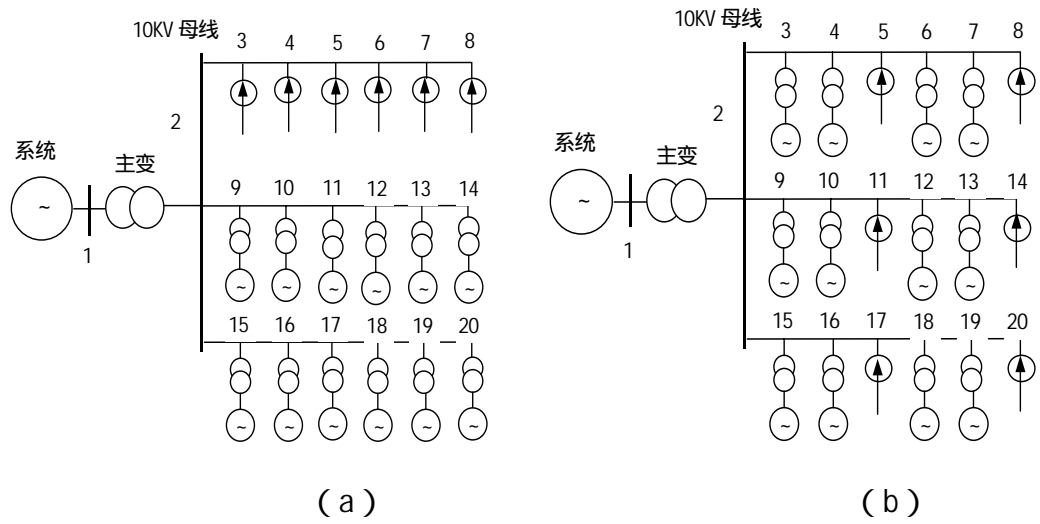


图 4 风电系统接线示意图

根据不同的发电机配置方案，计算时分以下二种情况：

- (1) 变速恒频风力发电机全部集中在一条线路上，如图 4 (a) 所示；
- (2) 把三种型号的发电机平均布置在三条线路上，如图 4 (b) 所示。

根据本文所建数学模型，利用 VB6.0 编制了谐波仿真计算的程序，并针对上述风电系统进行了谐波计算，为简单起见，这里只给出部分 5、7 次谐波的计算结果，结果如表 1 所示。计算时，变速恒频风力发电机容量按 1500KW 考虑，同步风力发电机和异步风力发电机容量均按 500KW 考虑。

表 1 风电系统谐波电压（标么值）计算结果

节点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
情况(1)	5 次	0.56	3.22	5.73	7.81	9.47	10.71	11.53	11.95	2.93	2.69
	7 次	0.52	3.03	5.41	7.39	8.97	10.15	10.93	11.33	2.76	2.54
情况(2)	5 次	0.44	2.54	3.03	3.58	4.18	4.39	4.69	5.07	3.03	3.58
	7 次	0.41	2.38	2.86	3.37	3.94	4.14	4.42	4.78	2.86	3.37
节点		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
情况(1)	5 次	2.51	2.38	2.29	2.25	2.97	2.77	2.63	2.54	2.51	2.50
	7 次	2.37	2.24	2.16	2.12	2.80	2.62	2.49	2.41	2.37	2.36
情况(2)	5 次	4.18	4.39	4.69	5.07	3.03	3.58	4.18	4.39	4.69	5.07
	7 次	3.94	4.14	4.42	4.78	2.86	3.37	3.94	4.14	4.42	4.78

另外，对于情况（1）注入电力系统（110KV）的 5、7 次谐波电流分别为 6.5A 和 4.3A，对于情况（2）注入电力系统的 5、7 次谐波电流分别为 5.1A 和 3.4A。

根据上述谐波计算结果可以看出：(1) 当风电系统含有较多的变速恒频风力发电机且集

中连接时,在大运行方式下,风电系统会出现很大的谐波电压,对系统安全运行构成威胁,应采取必要的措施;(2)把三种不同类型的风力发电机均匀配置在不同线路上,可以大大降低系统的谐波含量,在不额外增加设备和投资的情况下,是一种行之有效的消谐措施,应积极采用。

结论与展望

风力发电由于其本身的特点,并网后会给电力系统带来不利影响或危害,并造成电力系统一些运行特性的改变,研究风力发电对电力系统的影响,并进行必要的仿真不论是对电力系统的运行,还是风电系统的运行都是非常重要的。

谐波是风电影响的一个重要方面,由于谐波频率远大于系统运行频率,加之电网的复杂性,在某些条件下(如安装有并联补偿电容器)可能会引起谐波放大,甚至系统谐振,所以对风电系统的谐波问题应给予必要的关注。在风电场中,因尽量避免单一的变速恒频风力发电机集中连接,这样会在局部造成过高的谐波电压,对风电系统的安全运行构成威胁。采用不同类型的风力发电机混合配置,可以有效降低系统的谐波含量,是一种有效的抑制谐波的措施。

主要参考文献目录

1. 尹炼,风力发电,北京:中国电力出版社,2001
2. 王承煦,风力发电实用技术,北京:金盾出版社,1995
3. 李谦,风力发电场对电网的影响,宁夏电力.2004年增刊
4. 孙涛,王伟盛,风力发电引起的电压波动和闪变,电网技术,2003年第12期
5. 陈树勇,戴慧珠,风电场的输出功率特性研究,风力发电,1998年第12期
6. 张直平,李芬辰等,城市电网谐波手册,北京:中国电力出版社,2001
7. 阿里拉加.J等著,唐统一等译,电力系统谐波,徐州:中国矿业大学出版社,1991
8. 吴竟昌等,电力系统谐波,北京:水利电力出版社,1988
9. 关勇,辉腾锡勒风电场谐波状况调查测试分析,内蒙古电力技术,1998年第四期

联系方式:

联系人	赵书强
联系电话	13832283602、0312-7522758(H) 7522252(O)
传真	0312-7522251
E-mail	ZSQDL@163.com
通信地址	河北省保定市华北电力大学17#信箱
邮政编码	071003