

风电接入对电能计量影响的初探

晏荣贵, 黄程

(崇州供电局, 四川 崇州 611230)

摘要: 为了研究风电接入对现行电能计量装置影响的问题, 分析了双馈电机转子侧变频器的机理, 并给出了变频器输出电压的谐波成分。在此基础上根据现行电能计量装置工作机理, 说明了谐波影响电能计量的原理, 论证了风电接入将对电能计量的准确性和公平性造成较大影响, 最后给出了针对新情况下电能计量的改进措施。

关键词: 风电; 双馈电机; 谐波; 电能计量

Abstract: In order to study the impact of wind power integration on the existing electric energy metering devices, the working mechanism of the frequency converter in rotor side of double-fed motor is analyzed, and the harmonic components of the output voltage of the inverter are given. On this basis, according to the working mechanism of the existing electric energy metering devices, the principle of how the harmonics affecting electric energy metering is also described, and it is demonstrated that the wind power integration will lead to a great impact on the accuracy and fairness of electric energy metering. At last, some improvements of electric energy metering in the new circumstances are put forward.

Key words: wind power; double-fed motor; harmonic; electric energy metering

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0041-05

0 前言

近年来, 随着世界经济的高速发展, 以煤、石油、天然气等化石燃料为主的传统能源的消耗也越来越巨大。但这些燃料储量有限且不可再生, 所以人类正面临着空前严重的能源危机。为解决能源危机, 保护赖以生存的环境, 各国积极探索可用的新能源来替代传统能源。风能作为一种储量丰富且可再生的能源, 正越来越受到各国的青睐。中国也很重视风能的利用, 尤其是在风能发电这一块。到目前为止, 中国的风能发电总装机容量已超过 25 000 MW, 而且每年这个数字都在增长。可见, 未来中国风电产业将成为中国能源的重要组成部分, 这也给中国乃至世界经济的发展带来巨大的机遇^[1]。

然而, 风电的大量接入也会对电网带来一些负面冲击。风能发电机组大多采用双馈电机, 通过变速恒频的方式来获得正弦电压。为获得稳定的正弦电压, 往往要在发电机端装设电力电子设备来控制发电机的转速和频率^[2]。这些电力电子设备一般采用 SPWM 控制技术, 故而会给电网带来大量的谐波污染, 使电力系统电压、电流波形发生畸变^[3]。

谐波的一大危害就是给电能计量带来计量误差。电能计量是电网经济核算的依据, 电能计量精度直接关系到电力供需双方的经济效益和社会效益。电能表是电能计量的基本量具, 其准确度直接关系到电能计量的精度。随着电力系统规模的不断扩大以及风电等新能源的不断接入, 系统中非线性负荷如大功率整流和变频装置以及各种电力电子设备等不断增加, 电力系统受到的谐波污染也越来越严重。所以, 研究风电接入后谐波对电能计量的影响具有重要的现实意义^[4]。下面将分析风电接入后谐波产生的机理, 并对谐波给电能计量带来的影响做出分析, 最后, 对解决谐波问题的措施进行初探。

1 双馈电机谐波特性分析

1.1 双馈电机变频器工作原理

双馈电机是在异步电机和同步电机的基础上出现的一种新型电机, 它的定子绕组和转子绕组均采用三相绕组的连接方式, 结构与一般常见的绕线式异步电机相似。双馈电机的定子绕组和转子绕组分别和各自对应的三相对称电源相接, 其中定子绕组所接电源是固定工频电源, 而转子绕组所接电源则

是电压幅值、频率和相位能按照运行的具体要求进行调节的三相电源。由于电机的定子侧和转子侧都可以向外馈送电能,所以称之为双馈电机。图1为双馈电机的结构框图,图中双馈发电机的定子绕组直接和工频电网相连,稳定运行时其电压幅值、频率和电网电压的幅值、频率保持一致。转子绕组则由变频器供电,变频器输出频率、幅值变化的交流励磁电压来实现双馈发电机的变速运行,变频器的另一侧则直接或通过隔离变压器接入电网。

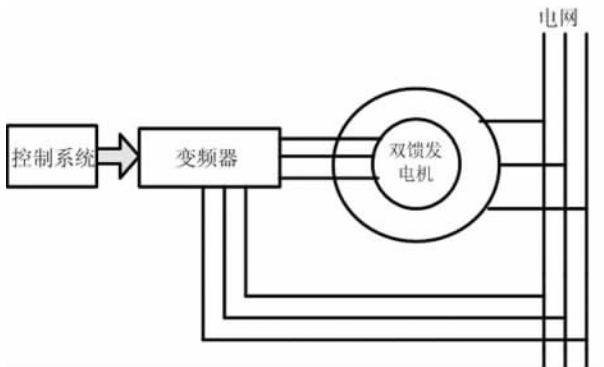


图1 双馈发电机系统结构框图

1.2 双馈电机变频器中的谐波分析

目前双馈发电机广泛用于风电机组之中,电机本身的谐波可忽略不计,其最大的谐波源是转子回路上的大功率变频器。由于风机变频器的容量约占机组容量的15%~20%,因此,变频器成为风机最大的谐波源。变频器的整流电路与电网侧连接,其产生的谐波直接注入电网,对电网影响最大,是整个变频器最主要的谐波源。

单相交交变频器由两组反向并联的晶闸管整流电路构成^[5],图2所示为6脉波桥式结构的单相交交变频器电路原理图。

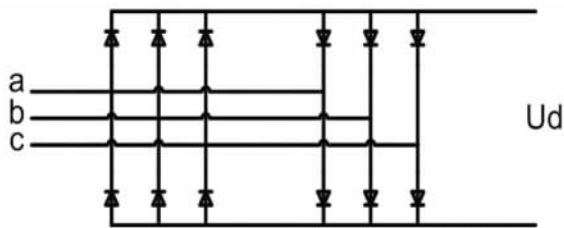


图2 单相交交变频器电路原理

装置中晶闸管的触发控制机理基本上同整流电路相同,唯一不同的是触发角的控制计算上,为实现交交变频器输出电压正弦化,在晶闸管的触发控制方式上一般采用余弦交点法^[3,6]。所谓余弦交点法是一系列“余弦同步电压波” U_i 作为载波信号,用给定的调制电压波 U_r 作为调制信号,并由载波和调制

波的交点去决定整流电路中相应晶闸管的触发时刻和顺序。根据余弦交点法的原理可知输出电压是由输入电压的一些片段组成的,这必然引入大量谐波。

交交变频器每相的输出电压是正、反两组整流桥输出电压之和,改变正、反两组桥的切换频率就可实现频率的变化,这样由正组桥和反组桥组成的电路就可达到变频的目的。

$$U_d = U_{d+} \cdot p + U_{d-} \cdot n \quad (1)$$

其中,

$$U_{d+} = 2.34U_\theta \cdot \cos(\beta) \quad (2)$$

$$U_{d-} = 2.34U_\theta \cdot \cos(180 - \beta) \quad (3)$$

$p = 1, 0$ 分别表示正组桥工作和不工作; $n = 1, 0$ 分别表示反组桥工作和不工作; U_θ 为整流电路输入相电压; β 为触发角。

这里主要分析交交变频器输出电压谐波中的特征谐波含量,即在理想条件下根据变频器工作原理必然会产生谐波分量。设组成交交变频器的相控整流器脉波数为 p ,供电电源(电网)频率为 f_i ,则当相控整流器输出恒定直流时,输出的电压谐波最低频率为 $p \times f_i$,其他高次谐波频率为其整数倍。但是当交交变频器输出电压基波频率逐渐增大时,电压谐波频谱也逐渐以 $p \times f_i \times n$ 为中心向两边发散偏移,表现为边带谐波,也即所谓的“旁频谐波”。边带谐波不仅与变频器输入频率 f_i 有关,还与输出频率 f_o 有关,表现为两者的拍频。初步分析表明,电压型交交变频器输出电压波形与以下因素有关。

- (1) 变流器脉波数 p ;
- (2) 输入频率 f_i ;
- (3) 输出频率 f_o ;
- (4) 电压调制深度 r_o ;
- (5) 负载功率角 φ_o ;
- (6) 触发角控制方法。

为了分析变频器输出电压的谐波含量,充分分析谐波源的谐波特性,在前面已有的对交交变频器结构和工作原理介绍基础上,用开关函数法^[7-9]分析理想条件下交交变频器输出电压谐波特性。

开关函数法的基本思想就是将被分析的波形表示成一系列已知波形(通常是三角函数波)与某些开关函数的乘积和的形式,只要将其中的开关函数展开成谐波序列,通过整理化简,可得到被分析波形的三角级数表达式。

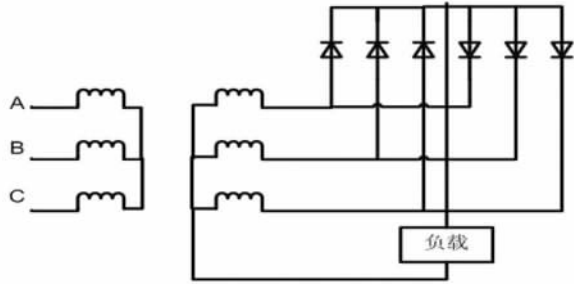


图3 零式结构的单相交变频器

由于各种交变频器的结构一般都由三相零式整流电路为基本单元组合而成,因此通过分析结构最为简单的零式变频电路的输出电压,便可导出其他形式交变频器的输出电压表达式。

参考文献[10]利用开关函数法可以推导出有环流模式交变频器输出电压解析表达式。

$$v_0 = c \frac{3\sqrt{3}V_{ph}}{2\pi} \left\{ 1.1r_0 \sin\theta_0 + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{3q} \right.$$

$$\left[\frac{a_{(pq-1)(2n+1)}}{pq-1} + \frac{a_{(pq-1)(2n+1)}}{pq+1} \right] \times [\sin(pq\theta_1 + [2n+1]\theta_0) - \sin(pq\theta_1 - [2n+1]\theta_0)] \quad (4)$$

其频谱分布为

$$f_k = |pqf_i \pm (2n+1) \cdot f_0| \quad (5)$$

其中, $q=1, 2, \dots; n=0, 1, 2, \dots, 3q$

系数 p, c 与变频器类型有关。

$p=6$ 为6脉波电路, $p=12$ 为12脉波电路;

$c=1.0$ 为6脉波零式或12脉波零式结构;

$c=2.0$ 为6脉波桥式或12脉波并联桥式结构;

$c=4.0$ 为12脉波串联桥式结构。

根据上面的讨论,由于双馈发电机采用交变频器励磁,因此转子电压中不但含有转差频率的基波电压,同时还含有大量的零序、正序和负序谐波分量。将变频器输出电压中的基波电压分量和各次正、负序谐波电压分量分别看为一系列独立励磁电源,使它们分别独立作用在双馈发电机转子回路上,这样就可以计算出基波电压分量和各次正、负序谐波电压分量在定子侧引起的基波、谐波电流的幅值。

通过本节的论证说明并网后双馈发电机定子侧电压波形含有丰富的谐波,严重畸变的波形将对电能质量造成影响,此时注入电网的谐波主要表现为定子电流谐波分量,发电机发出的电能质量不能满足电网要求,必须采取相应的措施。

2 谐波对电能计量的影响

2.1 不同形式负载下的谐波分析

电力系统中的负载根据其特性可分为线性负载和非线性负载。线性负载参数不随电压或电流变化而变化,而非线性负载参数则会随电压或电流变化而变化。

这里采用图4的简化电路分析谐波电能的来源。电压源 $u(t)$ 采用工频正弦电压,电路中 $Z_s = R_s + jX_s$ 为电源内阻抗, $Z_l = R_l + jX_l$ 为线路等值阻抗, $Z_L = R_L + jX_L$ 为线性负载阻抗, $Z_{FL} = R_{FL} + jX_{FL}$ 非线性负载阻抗。

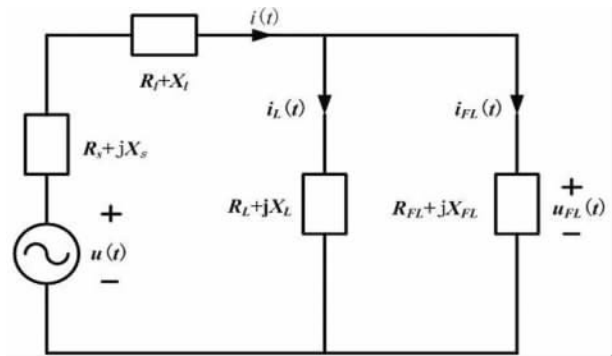


图4 系统简化电路

由于非线性负载的存在,从而系统电路中的电压、电流为基波分量和谐波分量的叠加。

$$i(t) = i_l(t) + \sum_{n=2}^N i_n(t) \quad (6)$$

$$i_l(t) = i_{Ll}(t) + \sum_{n=2}^N i_{Ln}(t) \quad (7)$$

$$i_{FL}(t) = i_{FLl}(t) + \sum_{n=2}^N i_{FLn}(t) \quad (8)$$

$$u_{FL}(t) = u_{FLl}(t) + \sum_{n=2}^N u_{FLn}(t) \quad (9)$$

电压源提供给系统的电能为

$$W = \int_0^t u(t) i(t) dt = \int_0^t u(t) i_l(t) dt + \sum_{n=2}^N \int_0^t u(t) i_n(t) dt \quad (10)$$

式(10)中第一项为电压源向系统提供的基波电能,第二项为电压源向系统提供的谐波电能,根据电路正交原理^[11],该项为0,即正弦电压源不向系统提供谐波电能,所以

$$W = W_1 = \int_0^t u(t) i_l(t) dt \quad (11)$$

电压源内阻和线路吸收的电能 W_{sl} 为

$$W_{sl} = \int_0^t (R_s + R_l) i_l^2(t) dt + \sum_{n=2}^N \int_0^t (R_s + R_l) i_n^2(t) dt$$

$$= W_{sl} + \sum_{n=2}^N W_{ln} \quad (12)$$

线性负载吸收的电能 W_L 为

$$W_L = \int_0^t R_L i_{Ll}^2(t) dt + \sum_{n=2}^N \int_0^t R_L i_{Ln}^2(t) dt$$

$$= W_{Ll} + \sum_{n=2}^N W_{Ln} \quad (13)$$

非线性负载吸收的电能 W_{FL} 为

$$W_{FL} = \int_0^t R_{FL} i_{FLl}^2(t) dt + \sum_{n=2}^N \int_0^t R_{FL} i_{FLn}^2(t) dt$$

$$= W_{FLl} + \sum_{n=2}^N W_{FLn} \quad (14)$$

根据能量守恒定律有

$$W = W_{sl} + W_L + W_{FL} \quad (15)$$

即

$$\left. \begin{aligned} \text{基波能量守恒: } W_1 &= W_{sl1} + W_{Ll} + W_{FLl} \\ \text{谐波能量守恒: } 0 &= \sum_{n=2}^N W_{sln} + \sum_{n=2}^N W_{Ln} + \sum_{n=2}^N W_{FLn} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

故

$$\sum_{n=2}^N W_{FLn} = - \left(\sum_{n=2}^N W_{sln} + \sum_{n=2}^N W_{Ln} \right) < 0 \quad (17)$$

式(17)表明非线性负载是系统的谐波来源,由于非线性负载吸收系统的电能,即 $W_{FL} > 0$, 所以根据式(14)可知 $W_{FL} < W_{FLl}$, 而非线性负载本身是吸收消耗功率的,这就意味着非线性负载产生的谐波能量是由吸收的基波电能中的一部分转换而来的^[12]。

3.2 电能计量表因谐波产生的误差分析

现如今,常用的电能计量表主要有两种,即感应式电能表和电子式电能表。无论是感应式电能表还是电子式电能表都能对基波电能和一定频率范围内的谐波电能进行计量,但因其计量时没有完全把谐波功率考虑进去,故而在含有大量谐波的电网中会产生很大的计量误差。下面将对两种电能表误差产生的原因做出简单分析。

谐波对感应式电能表的误差分析,针对不同的电压电流波形,则从以下3个方面来讨论。

(1) 当电压为正弦波,电流发生畸变时,由于磁路的非线性使电压磁通中出现与谐波电流磁通同阶次的分量,产生附加的驱动力矩。当电流畸变增大时,感应式电能表误差随之增大且为正方向,但电流畸变小于10%时,电能表计量误差在其准确度要求

范围之类^[13]。

(2) 当电流为正弦波,电压发生畸变时,谐波电压及电流磁通要产生附加的自制动力矩^[13]使感应式电能表产生负误差,但电压畸变率在30%以内时其计量准确度仍在规定范围之内。

(3) 存在谐波功率时,感应式电能表基本忽略了5次以上的高次谐波功率。感应式电能表少计量3次谐波5%~30%,5次谐波80%~95%。但值得注意的是,谐波的功率潮流也会对其产生计量误差。当用户为线性用户时,基波和谐波潮流一致,电能表计量的能量大于基波能量,为基波能量和谐波能量之和,这就使线性负载用户吸收了谐波却多交了电费;而用户为非线性用户时,基波和谐波潮流方向,电能表计量能量小于基波功率,为基波能量和谐波能量之差,这样非线性负载用户产生了谐波却少交了电费,给电力部门带来巨大的经济损失^[14]。

而电子式电能计量表分热电乘法器式及时分割乘法器式电能表。文献[13]将电子式电能表分为A、B两类,A类能反映宽频带范围内电能,B类只能反应基波和二次谐波电能。相对于感应式电能表,电子式电能表的计量误差要小一些,但是都忽略了谐波功率的计量,这是现行电能计量装置的通病。类似于感应式电能表,可从两个方面来考虑电子式电能表的计量误差。

(1) 当电压和电流信号只有一个发生畸变,而另一个还是正弦波时,根据正旋函数的正交性,在这种情况下电子式电能表的误差变化很小,可认为不变。

(2) 当存在谐波功率时,对于能计量谐波功率的电能表,同样可以按其频响特性来进行分析。一般来说,频率越高,带来的计量误差就越大。而误差的来源跟很多因素有关,比如电子式电能表的机械性能,乘法器内部和外部的各项参数等等都会影响到其计量的准确性。对于电子式电能表的计量误差可以建立一个数学模型,但其过程相当繁琐复杂,这里就不予分析和说明了。这里,可以参考文献[15]中的模型。

3 解决措施的初探

根据前面的分析,双馈发电机的大功率变频器是非线性负载的一种,会给系统带来大量谐波,而谐

波对于电能计量装置(主要是感应式和电子式电能表)会带来计量误差,从而给电力部门和用户带来巨大的经济损失。这也是风电的接入会给系统的电能计量带来负面影响的直接原因。

研究风电接入的谐波环境后,针对目前的计量现状,人们已经有了一些初步的措施来应对谐波对电能计量的影响。为了减小谐波对电能计量的影响,可以在计量装置或者双馈发电机的变频器上加装滤波装置,滤掉谐波电流。

除此之外,现行的计量方式存在缺陷。由第3部分的分析,知道无论是对于感应式电能表还是电子式电能表,在计量线性用户用电和非线性用户用电时都会出现误差。线性用户不但多交电费,而且受到谐波损害;非线性用户虽然污染了电网,反倒少交了电费。由此可见,对现行的电能计量方式进行改变也十分重要。解决的方法可以采用分别计量基波电能和谐波电能,并且同时记录谐波电能方向的计量方式。按照电力成本合理分摊的电价体系,对吸收谐波电能的客户在电力价格或用电量上适当给予谐波分量补偿;对向电网注入谐波电能的客户要给予电力成本合理分担,按谐波分量的比例对其用电价格进行调整或处罚,是非常有必要的^[16]。计量方式要改变,首先还得从计量装置的改进出发,比如采用傅氏算法电能计量装置,这样可以把各次谐波产生的有功电能和无功电能都考虑进去,其结果肯定更加接近系统实际^[17-18]。

4 结 语

在国家未来的电网结构中,风电所占的比例会越来越大,其并网带来的谐波问题对电能计量的影响也会与日俱增。而如今,社会对电能质量的要求也越来越高,那么如何抑制谐波,如何进一步提高电能计量的精度这个课题将会重新引起人们的重视。针对此问题,对风电接入产生谐波的原因和谐波对电能计量的影响进行了分析,并由此对去除风电谐波和改良电能计量的措施进行了初步性探索。

参考文献

[1] 田德. 国内外风力发电技术的现状与发展趋势 [J]. 新

能源产业, 2007(1): 51-56.

- [2] Manfred Stiebler. 风力发电系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011
- [3] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] 高笑, 王步云, 龙燕, 等. 电力谐波及其对电能计量的影响 [J]. 后勤工程学院学报, 2004.
- [5] 朱宁. 风力发电 PWM 变流器及其控制策略 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [6] 任永峰. 并网型交流励磁双馈电机风力发电系统研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2008.
- [7] 李斌. 变速恒频风力发电系统的运行仿真及谐波特性研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- [8] 万航羽. 双馈风力发电机建模及谐波分析 [J]. 电机电器, 2008, 27(5): 53-57.
- [9] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频风力发电机励磁控制技术 [J]. 中国电机工程学报, 2003(11): 122-125.
- [10] 王文举. 交流励磁发电机输出电力谐波抑制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [11] 周守昌. 电路原理第2版(上册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [12] 韩如成, 赵旭, 等. 谐波对电能计量影响的分析及对策研究 [J]. 太原重型机械学院院报, 2002, 23(3): 216-220, 240
- [13] 高次谐波对不同类型电能表计量误差影响的分析 [R]. 上海表计工厂技术报告, 1991.
- [14] 杨本渤. 谐波对电能计量仪器的影响 [J]. 电测与仪表, 1993, 30(11): 5-10, 21.
- [15] 许仪勋. 谐波对电能计量的影响与对策 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [16] 张卓, 骆盛君. 对谐波影响下的电能计量方式的探讨 [J]. 广东电力, 2002, 15(4): 55-57.
- [17] 赵建国, 石岩. 电能计量中的谐波分析 [J]. 中国电力, 1997, 30(12): 21-24.
- [18] 郑春强. 谐波对电能计量的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2008.

作者简介:

晏荣贵(1978), 男, 西南交通大学毕业, 主要研究方向为发电厂及电力系统与电能计量;

黄程(1979), 男, 中国农业大学毕业, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

(收稿日期: 2012-03-23)