

风力发电经分频输电接入系统的实验

宁联辉, 王锡凡, 滕予非, 刘奎, 宋卓彦, 朱卫平

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Experiment on Wind Power Grid Integration via Fractional Frequency Transmission System

NING Lianhui, WANG Xifan, TENG Yufei, LIU Kui, SONG Zhuoyan, ZHU Weiping

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Fractional frequency transmission system (FFTS) provides a novel approach for the remote wind farm integrated into grid. This approach could overcome the great challenges caused by the randomness and the intermittence of the wind power. The key equipment of FFTS was cycloconverter. First, an experimental FFTS was proposed. And the power circuit and the control circuit of the 12-pulse cycloconverter were designed. In this experimental system, a synchronizing generator was used to simulate the permanent magnet synchronous generator (PMSG) in wind farm. Furthermore, the operation mode of cycloconverter was discussed. Finally, the open-loop active power regulations method was also introduced. Experiment results show that this system can transmit 20 kW electric power into grid, and verify the realizability of the system which used to integrate wind power into grid via FFTS.

KEY WORDS: wind power; integration into grid; variable-speed variable-frequency; 12-pulse cycloconverter

摘要: 风力发电具有随机性、间歇性, 而且风电场一般处于偏远地区, 风电经分频输电接入电网为风电的远距离输送提供了一个解决方案。该文设计了 12 脉波交交变频器的主电路和控制电路, 并以其作为风电接入装置, 用常规同步发电机模拟永磁直驱同步发电机, 在动模实验室模拟了变速变频风力发电, 向系统成功输送 20 kW 有功, 证实了以分频输电为背景的变速变频风力发电的可实现性, 并在此基础上初步讨论了交交变频器的运行方式, 实现了风电场的有功开环调节。

关键词: 风力发电; 接入系统; 变速变频; 12 脉波交交变频器

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777052)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50777052).

0 引言

风力发电是当今新能源开发利用中技术最成熟、最具备开发条件的项目。我国风能资源丰富, 但是主要集中于新疆、河西走廊、内蒙和沿海地区, 而电力消耗主要集中在我国东部、中部和南部地区, 因此, 如何实现风电的远距离输送是一个极具现实意义而又十分紧迫的课题^[1-2]。文献[3]早在 1994 年就提出分频输电技术的概念, 文献[4]在此基础上对分频输电的可行性进行了详细的分析。2005 年, 文献[5]首次利用相控式交交变频器在动模实验室中实现了分频输电, 成功向系统输送 20 kW 有功功率, 其结果不但证明了分频输电理论的正确性, 更重要的是证明了它的实现不存在无法克服的技术障碍。由此可见, 分频输电是除特高压交流、特高压直流输电之外的另外一种远距离大容量的输电方式^[5-7]。同样, 基于分频输电技术的分频风电系统能够有效解决风电远距离输送的难题。

与目前广泛应用于风力发电系统中的变速恒频机组和恒速恒频机组接入方式相比^[8], 分频风电系统主要有以下优点:

第一, 在未经齿轮箱增速的情况下, 风力发电机组出口频率多在 12~18 Hz 之间, 正好在交交变频器的有效频率调节范围之内, 这样一来, 采用交交变频器将风电接入系统时, 不需要将风力发电机组的频率升高到工频附近, 这就省去了风电机组杆塔上的增速齿轮箱, 或者可应用增速比较小的齿轮箱, 不但降低了成本, 还大大提高了系统的运行可靠性。因此, 交交变频器是风电与

工频电力系统的“天然”接口。

第二,交交变频器低频侧频率和电压实时可变,这就意味着不但可以根据整个风电场频率优化的结果实时调节交变频器的低频侧频率,以达到最大风能利用的目的,还可以根据系统潮流计算的结果和控制目标实时调整低频侧电压,调节低频侧无功潮流,以满足系统电能质量和无功优化配置的需求。因此,从本质上来说,这是一种变速变频的风电接入方式。文献[9]阐述了风电经分频输电并入电网的概念。文献[10-11]在此基础上,对分频风电系统及其构成作了详细说明,并对风电场经分频输电接入系统后的运行特性作了仿真分析,结论表明:与常规接入电网方式相比,采用分频输电技术将风电并入电网,能够有效提高风力机的输出功率。

但是若该系统直接应用于风力发电系统,尚有下列不足:

首先,受限于脉冲生成算法的局限性,晶闸管的触发脉冲不能实时调节,无法实现低频侧输出频率在线调整,因此直接应用于风力发电时,只能按照恒速恒频的方式运行,达不到提高风能利用率的目的;其次,原有交交变频器主电路设计为6脉波主电路,其本征谐波总畸变率较高,即系统运行时低频侧电压和工频侧电流谐波含量较大,不符合电力系统对于电能质量的要求。

本文旨在对风力发电经分频输电接入系统的设想进行实验验证,研制满足变速变频风电要求的12脉波交交变频器主电路及其控制系统,并对其运行模式、输电效率、谐波分析等方面作进一步的分析与研究。

1 分频风电系统基本结构和运行方式分析

文献[9-11]对风力发电经分频输电接入系统的概念和构成做了简要介绍,分频风电系统结构图如图1所示。图中,12脉波交交变频器单元用以将风场经输电线路输送的电能馈入电力系统,是分频风电系统的关键装置;监控系统用以对整个系统的相关运行参数进行实时监控,并对分频风电系统的运行方式作出调节,在保证系统可靠运行的同时,实现对风能的最大限度利用,分频风电系统的运行方式主要指交交变频器低频侧频率的动态调整。

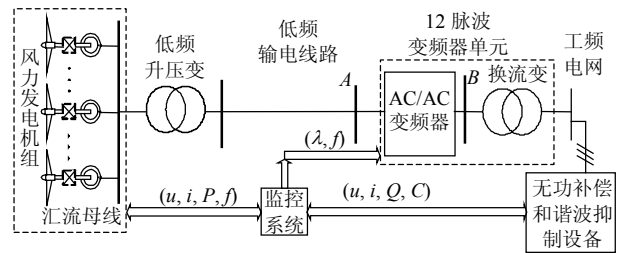


图1 风电经12脉波交交变频器接入系统结构图

Fig. 1 Structure of wind power grid integration via 12-pulse cycloconverter

如引言所述,本课题组已经在动模实验室利用相控式交交变频器成功的实现了分频输电,但其低频侧电压和工频侧电流谐波含量相对较大,且其低频侧频率不可变,即为固定的 $50/3\text{Hz}$;另一方面,根据本课题组的研究成果,当风力机频率在 $14\sim 18\text{Hz}$ 之间变化时,单机捕获的功率可提高 8.86% ,而对于整个风场来说,当全部风力机按照某个最优频率 f_0 并网时,尽管不能达到每台风力机捕获的风能最大,但是整个风电场依然可获得较高的风能利用率^[12],一般情况下, f_0 并不等于 $50/3\text{Hz}$,因此,以前用于验证分频输电理论可行性的6脉波交交变频器若直接应用于风电接入时,将不能最大限度的发挥交变频器的效能。

由此,在图1所示的分频风电系统中,当风电机组并网时,上层监控系统给出接入指令,交交变频器检测并网点两侧电压的相位、幅值和相角,当二者符合同期并网的条件时,发出触发脉冲,交交变频器主电路投入运行,风电即通过交交变频器接入电网;在正常运行期间,监控系统根据风电场的实时数据给出频率优化指令 f_0 ,并由通信接口送至交变频器的底层控制单元,交交变频器实时做出响应,调整触发脉冲,将风力机拖至优化频率 f_0 点运行,以最大程度的利用风能;当风电场需要与系统解列时,交交变频器在三相线路电流各自的过零点时刻关闭触发脉冲,此时,变频器停止工作,完成解列。

2 分频风电系统的实现

2.1 分频风电动模实验系统的构成

分频风电系统的动模实验接线示意图如图2所示,实验系统模拟比例为:电压取 $1000:1$;阻抗取 $10:1$ 。

由于实验条件所限,分频风电系统实验中,用

单台同步发电机组模拟永磁直驱型风电机群，其型号及参数如表 1 所示。低频升压变压器的参数如表 2 所示。

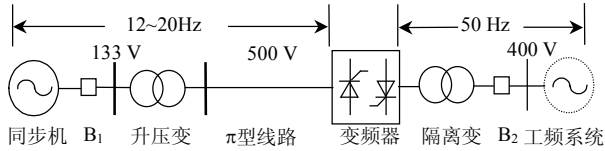


图 2 实验接线示意图

Fig. 2 Experiment configuration

表 1 发电机组参数

Tab. 1 Parameters of model generator unit

参数	交流发电机	直流电动机
生产厂家	兰州电机厂	西安电机厂
型号	TZH-280S4-TH	Z4-200-31
额定功率/kW	90	30
额定电压/V	400	440
额定电流/A	162	82.7
额定转速/(r/min)	1500	500

表 2 低频升压变压器的参数

Tab. 2 Parameters of transformer in low frequency side

参数	数值
额定容量/kVA	25
初级额定电压/V	133
初级额定电流/A	109
次级额定电压/V	500
次级额定电流/A	29
短路电压/%	4
接线方式	Δ/Y_0-11

输电线路模拟了 1 200 km 的 TACSR810mm²×4 型四分裂导线，根据阻抗模拟比和该型导线的参数可计算出模拟线路的参数如下：总电阻 $R=1.17\ \Omega$ ；总电感 $L=104.5\ \text{mH}$ ；总电容 $C=154.92\ \mu\text{F}$ 。

故采用 4 个串接 π 型输电线路模型模拟 1 200 km 输电线路时，每个线路单元的参数应为电阻 $R=1.17\div 4=0.293\ \Omega$ ；电感 $L=104.5\div 4=26.125\ \text{mH}$ ；电容 $C=154.92\div 8=19.365\ \mu\text{F}$ 。

再根据电压模拟比和阻抗模拟比可计算得功率的模拟比应为 $(U_1^2/|Z_1|):(U_2^2/|Z_2|)=100\ \text{MW}:1\ \text{kW}$ 。即动模实验室输送 1 kW 的有功，相当于实际系统输送 100 MW 的有功。

2.2 12 脉波交交变频器主电路设计

在采用分频输电的风力发电系统中，关键装置就是将分频电能接入系统的换流站，根据本课题组的分析结果，相对于 HVDC 系统的背靠背式换流站，采用相控式交交变频器作为分频系统和工频系统的接入设备具有较佳的经济性，原因在于：1) 交交变频器是一次变频，不需要中间的直流环节，效率较高；2) 12 脉波交交变频器低频侧不需要隔离变压器，而 12 脉波相控式背靠背换流站两侧都必须有隔离变压器；3) 背靠背式 HVDC 系统中的每个晶闸管在换流过程中工作时间要比交交变频器的每个晶闸管工作时间长，因而单管电压和电流有效值增大，阀体容量上升。

因此，本系统采用相控式交交变频器作为接入装置。参照 HVDC 的设计运行经验，工业应用中较成熟的晶闸管相控变流装置都采用 12 脉波主电路，以达到从电路拓扑结构上减小谐波的目的。本文采用多重化技术，利用变压器移相 30°，构成串联 12 脉波交交变频器，主电路结构(A 相)如图 3 所示。

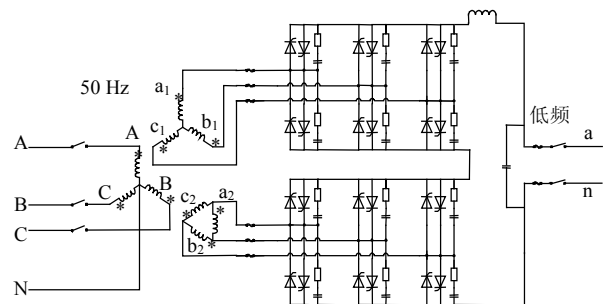


图 3 交交变频器主电路结构(A 相)

Fig. 3 Power circuit of cycloconverter (A phase)

2.3 换流变压器的参数选择

图 3 中，换流变压器采用三相三绕组型，接线方式为 Y/Y/ Δ -11，额定功率 12 kVA；为使串联的两组整流桥换相重叠角相同以减小非本征谐波含量，换流变压器 2 个二次侧绕组漏抗应满足：

$$L_{Ym} : L_{\Delta m} = \sqrt{3} : 1$$

根据分频风电实验的模拟比，变频器低频侧电压为 500 V，工频侧接 380 V 无穷大系统，因此换流变压器二次侧电压应为

$$\frac{\pi \times 500}{6\sqrt{3}\lambda} = \frac{\pi \times 500}{0.85 \times 6\sqrt{3}} = 178\ \text{V}$$

式中： λ 为输出电压比，考虑到最小逆变角的限制， λ 取值为 0.85。故换流变的变比应为

$$\frac{380/\sqrt{3}}{178} = \frac{220}{178}$$

实际系统中，换流变压器取变比为

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{220}{180}$$

换流变压器配有 8 组分接头，以适应调压需要。

2.4 整流阀和 RC 缓冲吸收电路参数的选择

本系统预计输送功率为 20 kW，因此，额定负载时，低频侧电流为

$$\frac{20 \times 1000}{\sqrt{3} \times 500} = 23A$$

RC 缓冲吸收电路的参数要视负载的情况而定，某一晶闸管关断后，随之而来的实际上是 RC 与线路电抗 L 共同形成的二阶动态电路的震荡过程，此电路不发生发散振荡的条件是 $R > 2\sqrt{L/C}$ 。由此选择： $R = 200 \Omega$ ， $C = 1 \mu F$ 。

2.5 交交变频器的控制系统

12 脉波交交变频器的控制系统主要功能是实现脉冲实时生成、零电流检测和逻辑无环流控制、同期并网和解列，运算量较大，且占用硬件资源很多，因此，在实际系统中，采用了双 DSP+CPLD 的全数字控制方案，控制系统方案如图 4 所示。

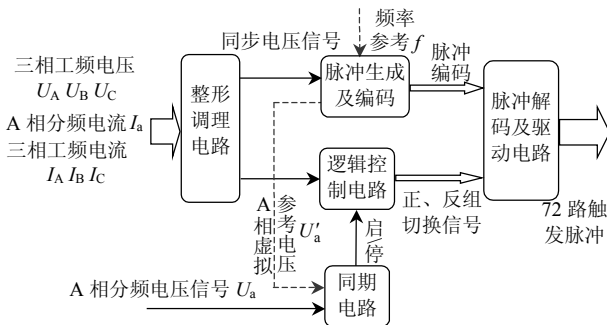


图 4 12 脉波交-交变频器总体控制方案
Fig. 4 Schematic of the control system for 12-pulse cycloconverter

图 4 中各部分主要功能如下：

1) 同期电路。检测同步点两侧电压、频率和相位是否满足同期并网的条件，给交交变频器逻辑

控制电路发出使能信号，以控制交交变频器的启/停。

2) 整形调理电路。动模系统中各个测点电气量的前级放大、波形变换及滤波处理。

3) 脉冲生成及编码电路。主要负责 72 路触发的脉冲实时生成、编码和分配，同时和监控系统进行数据交换，任务较为繁重，所以采用 TI 公司的 32 位定点高性能 DSP 控制器 TMS320F2812 作为主控 CPU，其底层算法为改进的“余弦交点法”，即在 DSP 内存中生成一个正弦表(720 点)，利用 13 个指针来分别代表 12 路同步基准信号和一路低频调制信号，通过不断修正指针地址偏移量并进行逐点比较的方法实时生成触发脉冲，控制交交变频器工作。由于 TMS320F2812 最多只能配置 56 个 I/O 端口，因此，需要对 I/O 端口进行编码扩展。脉冲生成部分的流程图如图 5 所示。

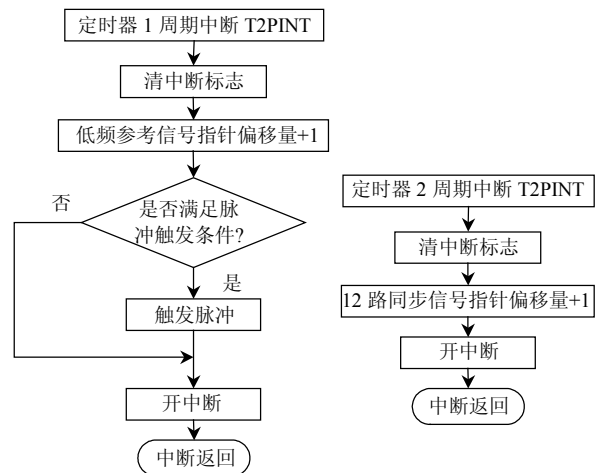


图 5 脉冲实时生成算法流程图
Fig. 5 Flow chart of pulse generation

4) 逻辑控制电路。主要负责零电流检测和逻辑无环流控制。零电流检测电路采用霍尔传感器零电流检测法实现，逻辑无环流控制板将零电流检测板检测到的负载电流过零信号进行逻辑分析和数字滤波，得到正、反组开通和关断的准确信号，送给主控板，作为闭锁脉冲之用，同时，合理设置正反组切换的死区时间长短，尽可能的在保证系统安全可靠工作的同时，减少交交变频器输出的非本征畸变。

5) 脉冲解码及驱动电路。用来对脉冲控制板生成的触发脉冲进行解码、分配和隔离放大。采

用 ALTERA 公司的高性能 CPLD 首先对脉冲进行解码, 然后, 将低频脉冲经过软调制, 得到 10 kHz 的脉冲列, 再经过驱动部分的隔离和放大, 送至晶闸管的触发端。

3 实验结果及其分析

3.1 并网及解列

由电力系统分析的相关理论可知, 当并网点两侧电压相量满足同期并网的条件, 即频率差、相角差和幅值差在允许的范围之内 (<5%), 则并网时电流冲击很小, 能够很快过渡到稳态。分频风电系统的并网点在交交变频器的低频侧, 用于比较同期条件的电压相量为输电线路末端的电压和交交变频器工作时将要生成的“虚拟”电压。并网成功之后, 交交变频器的逻辑控制电路会在线路电流的过零点对正、反桥进行切换, 此切换的频率即交交变频器低频侧的指令频率 f_0 , 此时, 发电机出力逐渐增大, 线路电流上升, 并网和解列过程分别如图 6、图 7 所示。

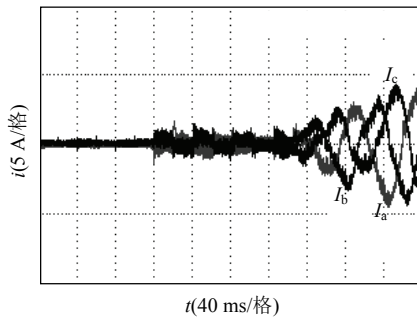


图 6 并网过程电流波形

Fig. 6 Current waveforms in synchronizing process

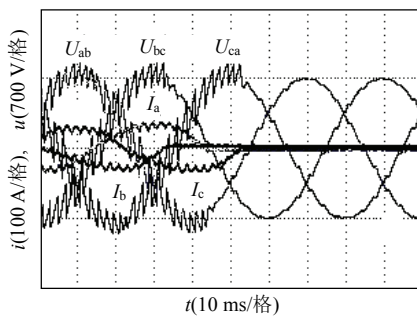


图 7 解列过程三相电压和电流波形

Fig. 7 Waveforms in unsynchronizing process

由图可以看出, 在并网初始阶段, 交换功率很小, 线路电流不大, 交交变频器中的个别晶闸管导通不完全, 但并网过程冲击不大, 三相电流

基本对称, 而且经过 0.24 s 就能很快稳定下来; 有功出力逐渐增大的时候, 晶闸管稳定导通, 三相电流严格对称, 进入稳态运行; 当风力发电机需要退出并列运行时, 在三相电流各自的过零点由逻辑控制电路闭锁脉冲, 此时, 晶闸管自然关断, 不会产生电流突变引起的电压过冲, 解列过程结束。

3.2 变频器并网运行的波形及其谐波分析

由于实验条件所限, 系统实际运行时, 是通过调速器通讯口下载风速模型模拟原动机, 以低频同步发电机模拟永磁同步发电机, 对风场经过 1 200 km 长、电压等级为 500 kV 的分布参数输电线路向系统输送功率进行模拟, 实验结果如图 8、图 9 所示。

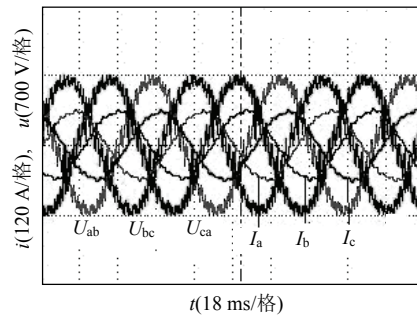


图 8 低频侧三相电压和电流波形

Fig. 8 Waveforms of three phase voltage and current for 50/3Hz

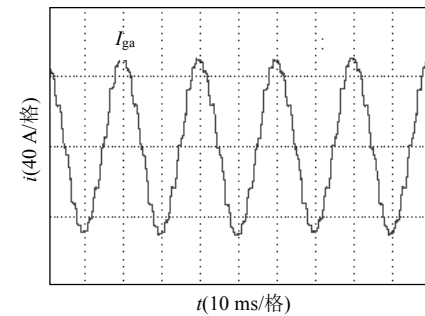


图 9 工频侧 A 相电流波形

Fig. 9 Waveform of current of A phase for 50Hz

图 8 为变频器低频侧三相电压和输电线路三相电流波形图, 从图中可以看出: 系统运行情况稳定, 三相对称, 由功率仪测得此时线路功率为 20 kW, 因此相当于实际系统输送了 2 000 MW 有功功率。由于线路采用 π 型分布参数模型, 分布电容的作用导致线路电流有较大畸变。另一方面, 相控式交交变频器对于电力系统来讲, 是一个非

线性负载,因此它在工作时会向系统注入大量的谐波电流,工频侧电流势必会有畸变,其结果如图9所示。

在模拟规模相同的条件下,当低频侧频率为50/3Hz时,与实验室原有6脉波交交变频器相比,12脉波交交变频器的低频侧电压谐波和工频侧电流谐波总畸变率(total harmonic distortion, THD)有很大降低,在不加滤波设备的时,采用横河SL1000数据采集系统对两种变频器低频侧电压和工频侧电流波形进行谐波分析的结果如表3所示。

表3 6脉波与12脉波变频器谐波分析结果比较

Tab. 3 Harmonic comparison between 6-pulse and 12-pulse cycloconverter

变频器	低频侧电压 THD/%	工频侧电流 THD/%
6脉波变频器	41.8	22.34
12脉波变频器	14.8	8.71

由表3可见,12脉波交交变频器低频侧电压谐波总畸变率为14.8%,工频侧电流谐波总畸变率为8.71%,而6脉波交交变频器工频侧电流谐波总畸变率为22.43%^[7],其低频侧电压谐波总畸变率以前未作记录,本次试验测得6脉波交交变频器低频侧电压谐波总畸变率为41.8%,可见,本文所设计的12脉波交交变频器与6脉波交交变频器相比,谐波总畸变量这一指标有显著下降,因此可以相应减小分频风电系统的无功补偿及滤波器容量^[13-14]。

3.3 开环频率调节实验

得益于控制系统底层所采用的脉冲实时生成算法,交变频器的低频侧频率可以根据风速变化实时作出调整,以实现风力发电的变速变频运行,从而达到整个风场风能的最大利用。本文在动模实验室中实现了分频风电系统的频率开环动态调节,结果如图10、图11所示。其中,图10为变频器满载20kW运行时,低频侧频率由16.10Hz升至17.00Hz的频率调整曲线和线路A相电流波形;图11为变频器轻载0.5kW运行时,低频侧频率由16.10Hz升至17.00Hz的频率调整曲线和线路A相电流波形。由图可知,变频器的低频侧频率变化范围在 ± 0.9 Hz时,原动机有功出力变化量与其额定值基本相同,达到 ± 19.5 kW,其频率调整是开环稳定的,这样,交变频器就

可以根据调度指令将风电机组频率拖至优化频率点 f_0 ,从而使整个风电场的风能利用率达到最大。图中频率曲线之所以有跳变,是由于测量仪器的测频算法不合适所致。

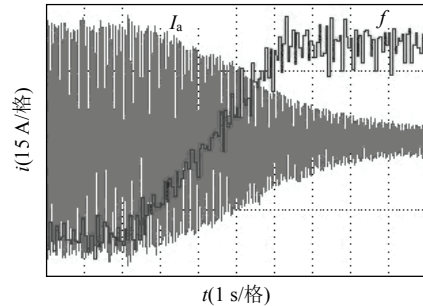


图10 频率由16.10 Hz升至17.00 Hz时的线路电流和频率波形

Fig. 10 Frequency and current waveforms when the frequency increases from 16.10 Hz to 17.00 Hz

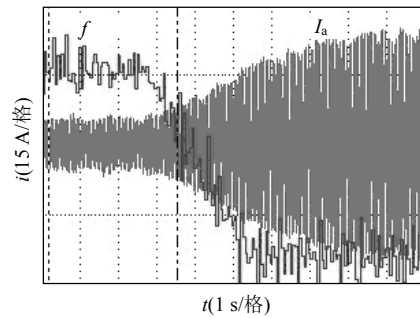


图11 频率由17.00 Hz降至16.10 Hz时的线路电流和频率波形

Fig. 11 Frequency and current waveforms when the frequency decreases from 17.00 Hz to 16.10 Hz

3.4 12脉波交变频器的效率实验

12脉波变频器单元包括晶闸管桥和换流变压器,其中,变频器的主电路即图1中的A点和B点之间的部分。由于功率分析仪测量通道数目的限制,无法同时测出3个三相变压器共计6个低压侧的三相功率,故假定3个换流变压器参数一致且A、B、C三相严格对称,现测得变频器两侧的功率如表4所示。

表4 交变频器的效率测试

Tab. 4 Efficiency testing of cycloconverter

A点三相功率/kW	B点B相功率/kW	
	Y绕组	D绕组
16.30	2.70	2.69

由此可得12脉波交变频器的传输效率为

$$\eta = (2.70 + 2.69) \times 3 / 16.30 = 99.2\%$$

可见, 交交变频器的传输效率很高, 因此整个输电过程功率损耗主要出现在输电线路和交交变频器的换流变压器上。

5 结论

1) 本文介绍了 12 脉波交交变频器主电路及其控制系统的研制情况, 对风力发电经过 12 脉波交交变频器接入系统进行了实验模拟, 成功向系统输送 20 kW 有功。根据动模实验系统的模拟比, 相当于实际分频风电系统输送 2 000 MW 有功, 并且实验过程中, 系统运行可靠、稳定, 证明了分频风电系统在技术上的可行性与有效性。

2) 由于采用了脉冲实时生成算法, 变频器低频侧频率可随风电场的频率优化指令动态调整, 既实现了风电场风能的最大利用, 又使该系统的运行方式更加灵活; 同时, 12 脉波变频器从主电路拓扑结构和控制方法上保证了它与 6 脉波交交变频器相比, 谐波总畸变量大幅降低, 当低频侧频率为 50/3 Hz 时, 低频侧电压谐波总畸变率由 41.8% 下降到 14.8%, 工频侧电流谐波总畸变率由 22.43% 下降到 8.71%, 从而有利于整个系统的无功优化配置与滤波器设计, 更符合工业实际的要求。

参考文献

- [1] 鲍爱霞. 大规模风电场容量可信度的分析及对华东电网备用的影响[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊): 34-38.
Bao Aixia. Analysis and research for capacity credit of large scale wind farms and influence on reserve capacity of east china electric power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(Supplemen): 34-38(in Chinese).
- [2] 候佑华, 齐军, 王小海, 等. 大规模风电场的建模及其在内蒙古电网安全稳定运行的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 71-78.
Hou Youhua, Qi Jun, Wang Xiaohai, et al. Modeling of a large-scale wind farm and the studying for its security and stability operation in inner mongolia grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 71-78(in Chinese).
- [3] Wang Xifan. The fractional frequency transmission system[C]//IEE Japan Power & Energy. Tokyo, Japan: IEEE, 1994: 53-58.
- [4] 王锡凡, 王秀丽. 分频输电系统的可行性研究[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(4): 5-13.
Wang Xifan, Wang Xiuli. Feasibility study of fractional frequency transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(4): 5-13(in Chinese).
- [5] 王锡凡, 曹成军, 周志超. 分频输电系统的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 6-11.
Wang Xifan, Cao Chengjun, Zhou Zhichao. Experiment on fractional frequency transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 6-11(in Chinese).
- [6] Wang Xifan, Cao Chengjun, Zhou Zhichao. Experiment on fractional frequency transmission system[J]. IEEE Trans. on Power System, 2006, 21(1): 372-377.
- [7] 曹成军. 分频输电系统的动模创建与实验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
Cao Chengjun. Dynamic model and experiment on fractional frequency transmission system[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005(in Chinese).
- [8] 宋卓彦, 王锡凡, 滕予非, 等. 变速恒频风力发电机组控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 8-17.
Song Zhuoyan, Wang Xifan, Teng Yufei, et al. Overview of control technologies for variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 8-17(in Chinese).
- [9] 王锡凡. 分频输电及其在风电等再生能源接入系统中的应用[J]. 动力与电气工程, 2008, 2(1): 12-14.
Wang Xifan. Fractional frequency transmission system and it's applications on wind power and renewable resource integration into system[J]. Power and Electrical Engineers, 2008, 2(1): 12-14(in Chinese).
- [10] 迟方德, 王锡凡, 王秀丽. 风电经分频输电装置接入系统研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 59-63.
Chi Fangde, Wang Xifan, Wang Xiuli. A new wind power grid connection method based on fractional frequency transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 59-63(in Chinese).
- [11] Wang Xifan, Wang Xiuli, Bie Zhaohong. Integrating wind farm into grid via FFTS [C]//Proceedings of 5th Nordic Wind Power Conference. Bornholm, Demark: Future Energy, 2009: 1-4.
- [12] 朱卫平, 王秀丽, 王锡凡. 变速变频风力发电系统最优风能捕获运行方式[J]. 电力系统自动化, 2009,

33(11): 94-98.

Zhu Weiping, Wang Xiuli, Wang Xifan. Optimal wind power capturing operational mode of a variable-speed variable-frequency wind power generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 94-98(in Chinese).

- [13] 干永革, 王文, 李发海, 等. 交交变频同步电机矢量控制系统供电电网谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 21-25.

Gan Yongge, Wang Wen, Li Fahai, et al. Study on harmonics of supply net of cycloconverter synchronous motor field-oriented control system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 21-25(in Chinese).

- [14] 李崇坚, 干永革, 王文, 等. 交交变频同步电机矢量控制系统网侧无功功率的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 61-65.

Li Chongjian, Yu Yongge, Wang Wen, et al. To study the reactive power on supply network of

cycloconverter fed synchronous motor system with field oriented control [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 61-65(in Chinese).



宁联辉

收稿日期: 2010-04-06。

作者简介:

宁联辉(1979), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统及其新型输电的分析及控制, ninglianhui@163.com;

王锡凡(1936), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 主要研究方向为电力系统分析、规划及电力市场;

滕予非(1984), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统及其新型输电的分析及控制。

(责任编辑 王剑乔)