

大容量多功能电网扰动发生装置的研究

针对我国风电机组在电网适应性测试方面的迫切需求，研究了一种新型的大容量、多功能的移动式电网扰动发生装置。系统包含基波及低次谐波逆变器、高次谐波逆变器，采用耦合变压器耦合的方式，可以较低的成本提升系统容量，并兼顾输出控制准确度。装置实现包含2~25次谐波的各种扰动功能，如电压偏差、频率偏差、谐波、闪变、不平衡及电压跌落等工况。通过升压变压器，还可直接模拟风电场35 kV配电网，用于现场风电机组各项电网适应性项目的检测需求。实验结果表明，该装置能经济地实现上述各项电网扰动发生功能。

周党生 黄 晓 廖荣辉 盛小军/深圳市禾望电气有限公司
李少林/中国电力科学研究院新能源研究所



周党生/高级工程师

关键词/Keywords

扰动发生装置 ·
谐波 ·
闪变 ·
电压跌落 ·

随着风电装机容量的迅速扩大，风电机组对电网的影响范围越来越大，风电并网的运行稳定性问题日益突出。其中，由于风电机组的电网适应性不强，导致无法适应现场电网电压波动、频率变化、三相不平衡或电压畸变的情况屡有发生^[1]。电网扰动发生装置是电网适应性测试的关键设备，支持谐波输出的现有装置往往仅采用1套逆变器（或多套逆变器级联），同时输出基波部分和谐波部分^[2, 3]，难以兼顾装置容量和输出准确度，其制造难度和系统成本限制了装置容量的提升。

针对我国风电机组在电网适应性测试方面的迫切需求，本文研究了一种新型的大容量、多功能电网扰动发生装置，包含基波及低次谐波逆变器，高次

谐波逆变器和耦合变压器。装置采用耦合变压器耦合的方式，可以较低的成本提升系统容量，并兼顾输出控制准确度。装置实现了包含2~25次谐波在内的各种电网扰动模拟功能，如电压偏差、频率偏差、谐波、闪变、不平衡及电压跌落等工况。通过设置升压变压器，还可直接模拟风电场35 kV配电网，用于现场风电机组各项电网适应性项目的检测需求。实验研制了1台2.5 MV·A大容量、多功能电网扰动发生装置，测试结果表明，该装置能经济地实现上述各项电网扰动发生功能，有效地满足了实际风电场内各风电机组电网适应性的检测需求。

大容量多功能电网扰动发生装置

1. 电路结构

大容量多功能电网扰动发生装置用于模拟三相三线制35 kV及其以下电压等级的电网系统的各种运行状况，进而对发电设备进行各类电网适应性测试，还可用于测试被测设备的其他电能质量特性。

图1为大容量多功能电网扰动发生装置的基本电路结构。

系统包括网侧降压变压器(T_1)，网侧滤波器(L_1, C_1)，可控整流器(Rec)，母线电容(C)，逆变器1(Inv₁)和逆变器2(Inv₂)，输出滤波器1(L_2, C_2)，输出滤波器2(L_3, C_3)，耦合变压器(T_2)和升压变压器(T_3)。

逆变器1(Inv₁)为基波及低次谐波逆变器，负责输出基波电压和低次谐波

国家能源应用技术研究及工程示范项目资助
(NY20110405-1)。

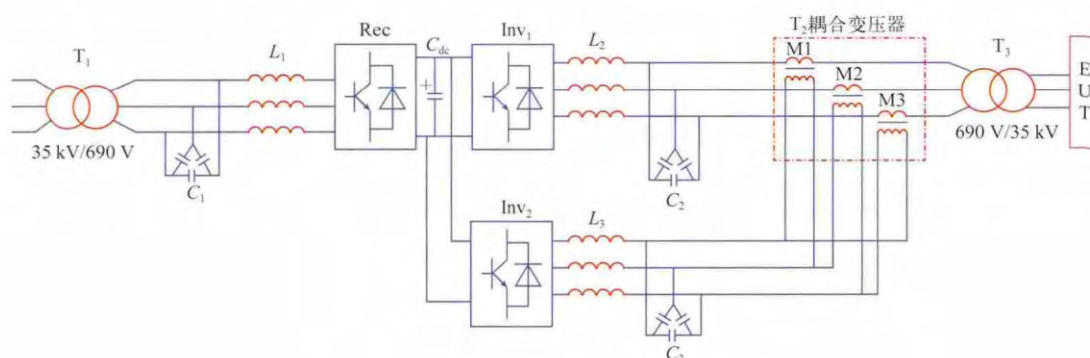


图1 大容量电网扰动发生装置的拓扑结构

电压（2~7次）。逆变器2（Inv₂）为高次谐波逆变器，负责输出高次谐波电压（8~25次）。通过变压器T₂，装置将基波电压和各次谐波电压耦合得到包含最终的输出电压。

2. 耦合变压器电压比设计

假设 v_{A1B1} 为逆变器1输出线电压， v_{A2B2} 、 v_{B2C2} 为逆变器2输出线电压， k 为耦合变压器电压比（一次侧：二次侧，并假设连接逆变器2一侧为一次侧），则最终输出电压 v_{AB} 为

$$v_{AB} = v_{A1B1} + (v_{A2B2} - v_{B2C2})/k \quad (1)$$

根据IEC等测试标准，电网电压谐波部分的幅值远远低于基波部分的幅值，一般总谐波畸变率（THD）在5%以内。作为电网扰动发生装置，本装置的谐波电压输出能力设置为基波电压的10%。

一般地，就某次谐波而言，逆变器2的输出电压 v_{A2B2} 、 v_{B2C2} 的相位相差 $2\pi/3$ ，则逆变器2的输出通过耦合变压器后，其幅值在最终输出中变为 $\sqrt{3}/k$ 倍，故有

$$\sqrt{3}/k \geq 10\% \quad k \leq 17.3 \quad (2)$$

为留有余量，耦合变压器的电压比实际取10:1。

3. 可控整流器的控制策略

可控整流器的主要功能是为逆变器提供稳定的直流输入电压，同时支持能量的双向流动，兼顾待测风机待机耗能和并网发电的两种功率流向。同时，其功率因数校正（PFC）功能可削弱装置本身对现场电网的影响。可控整流器的主电路如图2所示。

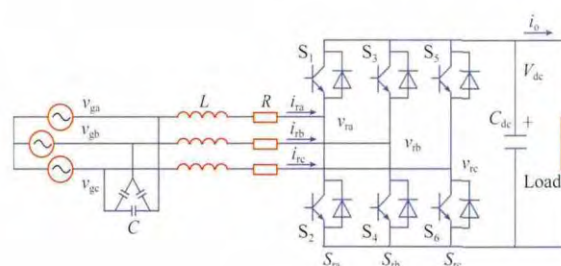


图2 可控整流器的电路模型

图2中， L 、 R 和 C 分别为输入滤波器中电感、电阻和电容的等效值； C_{dc} 为直流母线电容； v_{ga} 、 v_{gb} 和 v_{gc} 为各相输入电压； v_{ra} 、 v_{rb} 和 v_{rc} 为各相桥臂交流侧输出电压； i_{ra} 、 i_{rb} 和 i_{rc} 为各相桥臂电流； S_{ra} 、 S_{rb} 和 S_{rc} 为各桥臂开关函数； V_{dc} 为直流母线电压； i_o 为直流侧等效的负载电流。在本装置中，负载就是后面的逆变器。

根据可控整流器的电气模型和旋转坐标变换原理，可获得其基于电网电压定向的同步旋转坐标系（ dq 系）下的数学模型如下

$$\begin{cases} v_{gd} = R i_{gd} + L \frac{di_{gd}}{dt} - \omega L i_{gq} + v_{rd} \\ v_{gq} = R i_{gq} + L \frac{di_{gq}}{dt} + \omega L i_{gd} + v_{rq} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (S_d i_{rd} + S_q i_{rq}) - i_o \end{cases} \quad (3)$$

式中， v_{gd} 、 v_{gq} 为电网电压； i_{rd} 、 i_{rq} 为桥臂电流； v_{rd} 、 v_{rq} 为桥臂交流侧输出电压； S_{rd} 、 S_{rq} 为桥臂开关函数； ω 为同步旋转坐标系的旋转角速度。

可控整流器可采用电压、电流双闭环控制策略，其中旋转坐标系基于电网电压定向，实现 d

轴、q轴解耦控制，并通过电网电压前馈的措施加快响应速度，发波环节采用SVPWM方式，其控制框图如图3所示。

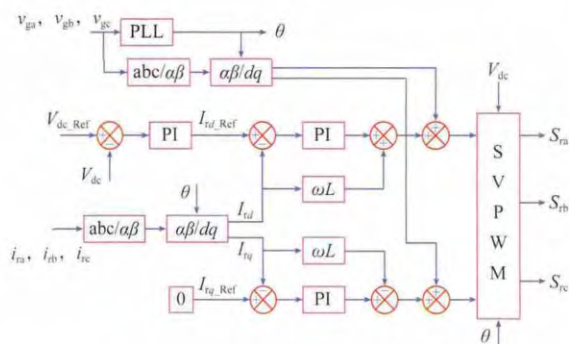


图3 可控整流器的控制框图

4. 逆变器的控制策略

逆变器的主要功能是输出三相可变的交流电压，包含电压、频率和相位等。基波及低次谐波逆变器负责产生基波及2~7次谐波电压成分，高次谐波逆变器负责产生8~25次谐波电压成分。由这些基本功能可发展出电压偏差、频率偏差、谐波、闪变、不平衡及电压跌落等各种扰动功能。

基波及低次谐波逆变器和高次谐波逆变器的电路结构、控制器结构基本一致，以下仅针对基波及低次谐波逆变器的设计进行说明，其主电路模型如图4所示。

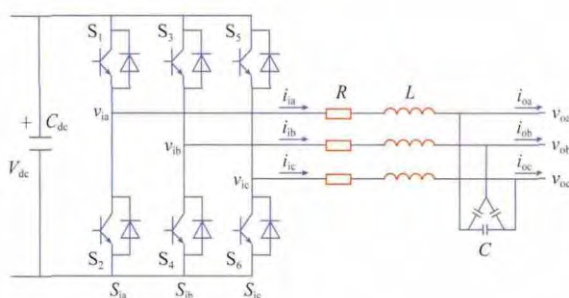


图4 逆变器的电路模型

图4中，\$L\$、\$R\$和\$C\$分别为输出滤波器中的电感、电阻和电容值；\$v_{oa}\$、\$v_{ob}\$和\$v_{oc}\$为各相输出电压；\$i_{oa}\$、\$i_{ob}\$和\$i_{oc}\$为各相输出电流；\$v_{ia}\$、\$v_{ib}\$和\$v_{ic}\$为各相桥臂交流侧输出电压；\$i_{ia}\$、\$i_{ib}\$和\$i_{ic}\$为各相桥臂输出电流；\$S_{ia}\$、\$S_{ib}\$和\$S_{ic}\$为各桥臂开关函数。

根据逆变器的电气模型和旋转坐标变换原

理，可获得其基于输出基波电压定向的同步旋转坐标系（dq系）下的数学模型如下

$$\begin{cases} v_{od} = v_{id} - Ri_{id} - L \frac{di_{id}}{dt} + \omega Li_{iq} \\ v_{oq} = v_{iq} - Ri_{iq} - L \frac{di_{iq}}{dt} - \omega Li_{id} \\ i_{id} = i_{od} + 3C \frac{dv_{od}}{dt} - 3\omega Cv_{oq} \\ i_{iq} = i_{oq} + 3C \frac{dv_{oq}}{dt} + 3\omega Cv_{od} \end{cases} \quad (4)$$

式中，\$v_{od}\$、\$v_{oq}\$为输出电压；\$i_{id}\$、\$i_{iq}\$为桥臂电流；\$v_{id}\$、\$v_{iq}\$为桥臂交流侧输出电压；\$\omega\$为同步旋转坐标系的旋转角速度。

逆变器可采用电压、电流双闭环控制策略，其中旋转坐标系基于输出基波电压定向，实现\$d\$轴、\$q\$轴解耦控制，并通过给定电压前馈、负载电流前馈等措施加快响应速度，发波环节采用SVPWM方式，其基本控制框图如图5所示。其中扰动指令发生器，用于根据用户期望的各种扰动功能设置和相关的参数输入，产生三相输出电压的瞬时给定值。

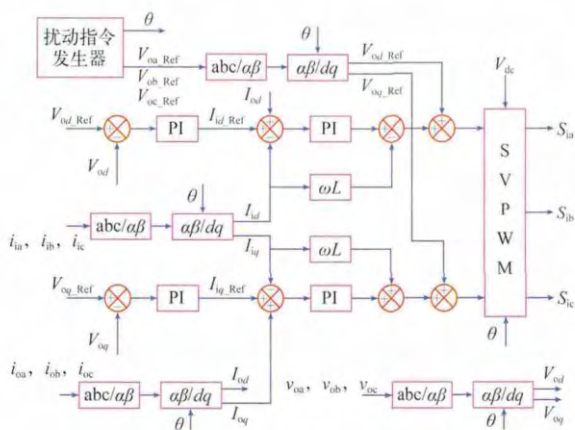


图5 逆变器的控制框图

实验结果

为验证所提方案的可行性，研制出一台35 kV/2.5 MV·A的电网扰动发生装置。其基本参数设计为：系统容量2.5 MV·A；电网侧降压变压器电压比为35 kV/690 V；可控整流器的额定输入为690 V，容量为2.5 MV·A，开关频率设置为3 kHz，直流输出电压设定为1 050 V；网侧滤波器的参数为\$L_1\$

$= 0.06 \text{ mH}$, $C_1 = 1\,002.6 \text{ }\mu\text{F}$; 逆变器1的额定输出为690 V, 容量为2.5 MV·A, 开关频率设置为3 kHz, 输出滤波器1的参数为 $L_2 = 0.06 \text{ mH}$, $C_2 = 557 \text{ }\mu\text{F}$; 逆变器2的额定输出为398 V, 额定容量为250 kV·A, 开关频率设置为9 kHz; 输出滤波器2的参数为 $L_3 = 0.4 \text{ mH}$, $C_3 = 3 \text{ }\mu\text{F}$; 耦合变压器额定容量为250 kV·A, 电压比为10:1; 输出侧升压变压器电压比为650 V/35 kV。

以下各种电网扰动模拟功能的实验结果。图6为电网谐波模拟功能, 图7为电网电压三相不平衡模拟功能, 图8为展示电网闪变模拟功能, 图9为电网电压跌落模拟功能。图中显示的电压为 V_{ab} , V_{bc} 两路线电压, 且其采样经过35 kV/100 V的TV。

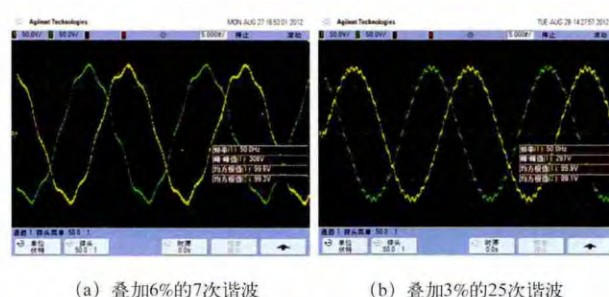


图6 电网谐波模拟功能

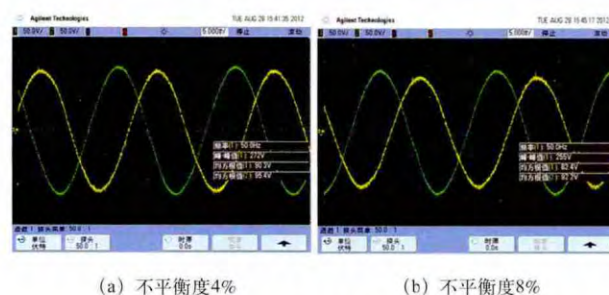


图7 电网电压不平衡模拟功能

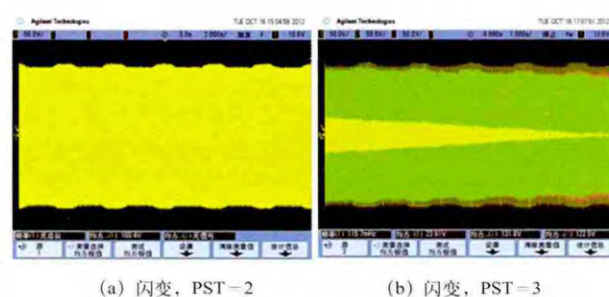


图8 电网电压闪变模拟功能

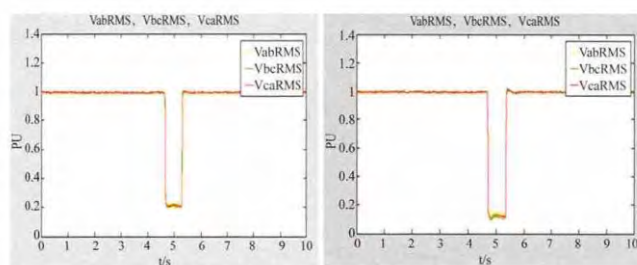


图9 电网电压跌落模拟功能

以上实验结果说明, 该装置在35 kV电压等级上实现了谐波、不平衡、闪变及电压跌落等各类扰动, 能较好地满足实际风电场内风电机组电网适应性的检测需求。

结束语

本文所提出的大容量、多功能的移动式电网扰动发生装置, 包含基波及低次谐波逆变器、高次谐波逆变器, 采用耦合变压器耦合的方式, 可以较低的成本提升系统容量, 并兼顾输出控制准确度。装置实现包含2~25次谐波的各种扰动功能, 如电压偏差、频率偏差、谐波、闪变、不平衡及电压跌落等工况。通过升压变压器, 还可直接模拟风电场35 kV配电网。实验研制了1台35 kV/2.5 MV·A大容量、多功能的电网扰动发生装置, 测试结果表明, 该装置能经济地实现上述各项电网扰动发生功能, 有效地满足了实际风电场内各风电机组电网适应性的检测需求。

参考文献

- [1] 梁亮, 李建林, 许洪华. 双馈感应式风力发电系统低电压穿越研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(3): 19-21.
- [2] 武健, 信家男, 徐殿国. 可编程电压质量扰动发生装置研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 37-38.
- [3] 赵剑锋, 王浚, 潘诗峰. 大功率电能质量信号发生装置设计及实验研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): .

(收稿日期: 2014-03-13) EA