

# 新能源分布式发电系统并网与离网运行的柔性切换技术

盛建科<sup>1</sup>, 曾嵘<sup>1,2</sup>, 年珩<sup>2</sup>, 余岳<sup>1</sup>, 徐凤星<sup>1</sup>

(1. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 研究了新能源分布式发电系统并网模式下的输出电流控制、离网模式不平衡与非线性负载下的输出电压控制、电网故障下离/并网运行的柔性切换技术, 提出了一种实现离/并网柔性切换的控制策略, 实验验证了所提方法的技术可行性。

**关键词:** 分布式发电; 并网; 离网; 比例积分谐振控制器(PIR); 柔性切换

中图分类号: TM76; TM464

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)02-0030-05

## Flexible Switching Technology of New Energy Distributed Generation System While Connecting and Disconnecting to the Grid

SHENG Jian-ke<sup>1</sup>, ZENG Rong<sup>1,2</sup>, NIAN Heng<sup>2</sup>, SHE Yue<sup>1</sup>, XU Feng-xing<sup>1</sup>

(1. CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract:** It researches the control strategy of output current of the new energy distributed generation system connected to grid, the quality control of output voltage of the power generation disconnected to grid with unbalanced and nonlinear load and flexible switching operation on connecting and disconnecting to the grid when voltage faults occur. A control strategy is proposed to realize the flexible switching and its feasibility is validated by experimental results.

**Key words:** distributed generation; grid-connected; off-grid; proportional-integral-resonant(PIR) regulator; flexible switching

### 0 引言

分布式发电(Distributed Generation, DG)是指直接布置在配电网或分布在负荷附近的发电设施, 可经济、高效、可靠地发电。大电网系统与分布式可再生能源相结合能提高系统安全性和灵活性, 被世界许多能源和电力专家一致认为是21世纪电力工业的主要发展方向<sup>[1-3]</sup>。

风能、太阳能、地热能、生物质能、海洋能等新能源的分布式发电系统通常是通过变流器与电网或负载连

接, 发电系统通过并网开关(如反向并联晶闸管)与电网连接, 而本地负载连接公共耦合点(PCC)。新能源分布式发电系统不仅要有并网运行的能力, 还需有稳定的离网运行功能, 此外系统还需能在并网运行和离网运行状态间顺利切换。当电网发生故障时, 分布式发电系统需立即从并网运行状态切换到离网运行状态, 为本地负载提供正常电能; 当故障消除, 电网电压恢复后, 分布式发电系统需从离网运行状态立即切换到并网运行状态。电网发生故障和故障恢复时如何实现系统在离网与并网运行状态间的顺利切换, 使本地负载稳定运行, 是新能源分布式发电系统必须解决的关键问题之一。

目前, 已有大量文献就发电并网运行时变流器的

收稿日期: 2012-01-06

作者简介: 盛建科(1970-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事新能源领域变流器的基础研究与产品开发工作。

控制作了报导。例如文献[4-5]论述了基于电网电压综合矢量定向的矢量控制策略,应用直流母线电压外环和电网输入电流内环双环控制变流器可实现系统稳定运行。文献[6]在传统比例-积分(PI)调节器方法基础上引入二倍频谐振控制的方法,以增强网侧控制器在不平衡电网下的控制性能。在离网运行控制中,文献[7]在正转同步速旋转坐标系中应用比例-积分调节器精确控制电压外环和电流内环,来实现离网型风电、光伏等系统在三相对称线性负载情况下的输出电压控制。对于改善负载侧变流器在不平衡和非线性负载下的输出性能,文献[8]提出了柔性交流输电系统(FACTS)技术中电压源逆变器在电网不平衡条件下运行与控制的新方案,采用1/4周期延时的最小时延正、负序分解技术,最大限度地减小了对控制动态性能影响的分解时延。文献[9-10]提出了采用基于正、负、零序分量分解和多PI控制器的三

相四桥臂逆变器,以提高不平衡和非线性负载下系统输出电压的性能,但动态控制的效果不佳。

本文以基于新能源的分布式发电系统为目标,研究新能源分布式发电系统变流器的逆变部分并网与离网运行的柔性切换技术,包括并网模式下输出电流的控制技术、离网模式不平衡与非线性负载下输出电压的控制技术和电网故障下离/并网运行的柔性切换技术。

## 1 新能源分布式发电系统并网运行技术

新能源分布式发电系统通过变流器连接电网或负载,发电系统通过并网开关与电网连接,而本地负载连接PCC(图1)。该系统的变流器按结构功能可划分为整流部分和逆变部分,其中的逆变部分称为网侧逆变器(简称逆变器),它将直流电压逆变为交流电压,并与电网并网或带负载。

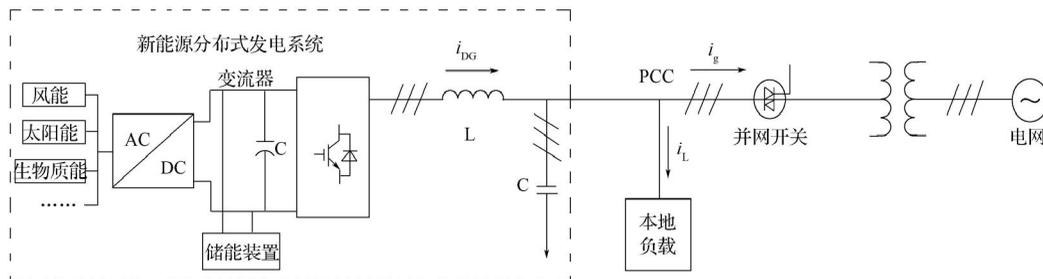


图 1 新能源分布式发电系统结构框图

Fig. 1 The structure of new energy distributed generation system

新能源分布式发电系统的并网运行控制通常采用基于电网电压综合矢量定向的矢量控制方式。在同步旋转 $d-q$ 坐标系中,将 $d$ 轴定向在电网电压综合矢量上,则电网电压 $q$ 轴分量为零,因而网侧逆变器控制模型可表示为:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= v_d + Ri_d - \omega Li_q + L \frac{di_d}{dt} \\ u_q &= v_q + Ri_q + \omega Li_d + L \frac{di_q}{dt} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} &= \frac{v_d}{u_{dc}} i_d + \frac{v_q}{u_{dc}} i_q - i_{dc} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$ ——分别为电网电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量;  $v_d$ 、 $v_q$ ——分别为逆变器交流侧输出电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量;  $i_d$ 、 $i_q$ ——分别为电网电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量;  $u_{dc}$ 、 $i_{dc}$ ——分别为直流母线电压、电流;  $L$ ——输入电抗器的电感;  $R$ ——输入电抗器的等效电阻;  $C$ ——变流器直流侧支撑电容。

在理想电网电压和基于电网电压综合矢量定向的情况下,  $u_d = U_g$ ,  $u_q = 0$ ,  $U_g$ 为电网电压综合矢量幅值。如图2所标的电流参考正方向,在三相静止坐标系到同步

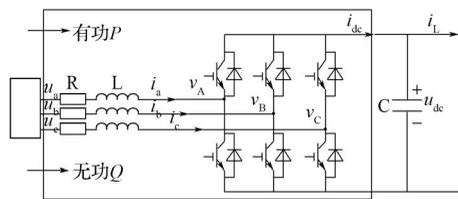
坐标系采取等幅变换的情况下,按瞬时有功、无功功率定义,逆变器与电网间交换的有功功率 $P$ 和无功功率 $Q$ 可分别表示为:

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \\ Q &= \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当 $Q < 0$ 时,表示逆变器对外呈容性,向电网发出无功;当 $Q > 0$ 时,表示逆变器对外呈感性,从电网吸收无功。 $P < 0$ 时,逆变器向电网馈送有功能量; $P > 0$ 时,逆变器从电网吸收有功能量。

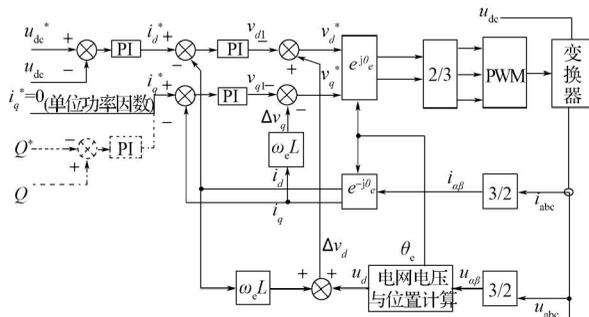
逆变器控制结构如图2所示,采取双闭环控制方式,外环为电压环、内环为电流环。直流环节给定电压 $u_{dc}^*$ 和反馈电压 $u_{dc}$ 的误差经PI调节后输出 $d$ 轴参考电流 $i_d^*$ ,而 $q$ 轴参考电流 $i_q^*$ 可由无功功率指令 $Q^*$ 与实际无功功率 $Q$ 的误差经PI调节输出给定。 $Q$ 可由式(2)计算得出,当要求逆变器输出电能控制为单位功率因数时, $i_q^*$ 可直接给定为0。 $i_d^*$ 、 $i_q^*$ 分别与对应的反馈值 $i_d$ 、 $i_q$ 相比较,误差信号经PI调节后输出 $v_{d1}$ 、 $v_{q1}$ ,再与各自的解耦补偿项 $v_{d2}$ 、 $v_{q2}$ 相运算得到逆变器交流侧参考电

压  $v_d^*$ 、 $v_q^*$ ，以此进行PWM调制产生驱动信号，以控制变流器。



(a) 主电路结构

(a) Structure of main circuit



(b) 系统控制原理

(b) Scheme of system control

图2 变流器控制框图

Fig.2 Control block diagram of grid-side converter

## 2 新能源分布式发电系统离网运行技术

图3是离网型新能源分布式发电系统带负载时的逆变器主电路示意框图，逆变器输出电压经LC滤波器滤波后加在负载上。其数学模型为：

$$\left. \begin{aligned} U_{inv} - U_o &= L \frac{di_{dg}}{dt} \\ i_{dg} - i_L &= C \frac{dU_o}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $U_{inv}$ ——逆变器逆变出的相电压； $U_o$ ——经过LC滤波后的系统输出相电压； $i_{dg}$ ——电感电流； $i_c$ ——滤波电容电流； $i_L$ ——负载电流。

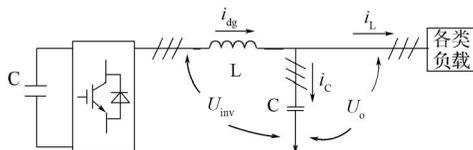


图3 逆变器主电路框图

Fig.3 Main circuit of inverter

为了在不平衡或非线形负载情况下输出恒幅恒频电压，需采用电压闭环控制技术，不仅要控制输出电压的基频分量，还须有效控制输出电压的负序或谐波分量，其控制框图如图4所示。为了解决比例-积分(PI)控制器对电压谐波分量调节能力不足的问题，在基波正序同步旋转坐标系下，以常用的PI控制器为基础，在

系统的逆变器控制中引入谐振控制器，以改善逆变器在各种负载下的输出性能<sup>[11]</sup>。

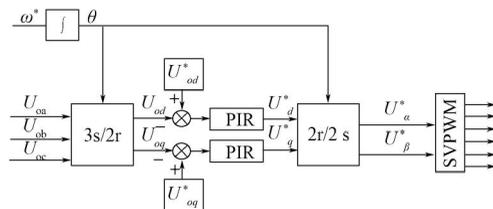


图4 基于PIR控制的变流器控制框图

Fig.4 Control block diagram of inverter based on PIR

图4中，采样三相输出电压  $U_{oa}$ 、 $U_{ob}$ 、 $U_{oc}$  作为反馈电压，经三相静止坐标系到二相同步旋转坐标系后得到  $d$ 、 $q$  分量  $U_{od}$ 、 $U_{oq}$ ，然后分别与给定电压  $U_{od}^*$ 、 $U_{oq}^*$  比较，其误差经比例-积分-谐振控制器调节，最后得到SVPWM调制所需的电压指令。

以消除输出电压的负序和5、7次谐波为控制目标，其中的比例-积分-谐振(PIR)控制器开环传递函数为：

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{2K_{R2}\omega_{c2}s}{s^2 + 2\omega_{c2}s + (2\omega_0)^2} + \frac{2K_{R6}\omega_{c6}s}{s^2 + 2\omega_{c6}s + (6\omega_0)^2} \quad (4)$$

该控制器由比例-积分控制器、二倍频谐振控制器及六倍频谐振控制器综合而成。式中， $K_p$ 、 $K_i$  分别为比例、积分系数， $K_{R2}$ 、 $K_{R6}$  分别为二倍频谐振控制器系数和六倍频谐振控制器系数。二倍频谐振控制器用于消除输出电压的负序分量，六倍频谐振控制器用于消除输出电压的5、7次谐波分量。

## 3 并网与离网运行柔性切换技术

### 3.1 离网运行至并网运行的切换

当电网出故障，新能源分布式发电系统需脱离电网独立带负载运行。当电网故障清除，电网电压恢复后，PCC处电压的幅值和相位与电网电压的幅值和相位可能不一致，为了防止出现较大的并网冲击电流，在并网开关重合前，要求调节逆变器输出电压的幅值和相位，使其与电网电压的一致。

图5(a)为离网状态下的并网控制过程。变流器的控制系统监视电网电压，当检测到电网故障清除，电压恢复后，变流器的逆变侧采用电压闭环控制，使输出电压跟踪电网电压以实现同步。当检测到变流器逆变侧输出电压的幅值和相位与电网电压的一致时，闭合变流器的并网开关，此时变流器逆变侧由电压闭环控制切换至电流闭环控制。

### 3.2 并网运行至离网运行的切换

图5(b)为并网状态下的离网过程控制流程。变流

器的控制系统实时采样PCC处的电压,当电网发生故障时,变流器逆变侧的输出端会产生电压跌落。当检测到电压跌落到设定阈值时,确认电网故障已发生,立即发出并网开关断开指令,并计算和保存脱网前一刻PCC处的电压幅值和相位。同时变流器逆变侧从电流闭环控制切换至电压闭环控制,初始时将脱网前一刻电压的幅值和相位作为脱网后电压闭环控制中的幅值和相位参考值,以避免切换瞬间因负载电压突变而产生冲击电流。然后变流器逆变侧通过电压闭环控制,使输出电压逐步升至负载电压额定值。

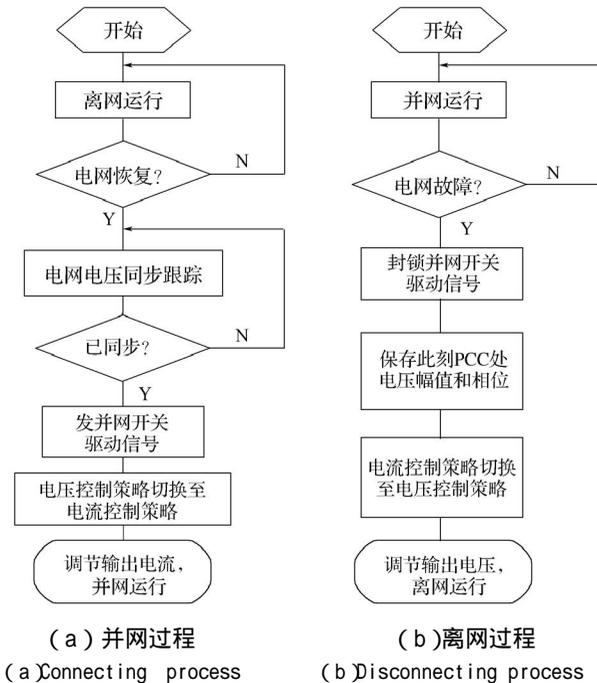


图5 分布式发电系统离/并网柔性切换控制流程图  
Fig. 5 Control process of flexible switching for distributed generation system while connecting and disconnecting to the grid

3.3 频率调节

从离网运行切换至并网运行的过程中,逐渐增加或减少输出电压的幅值来实现变流器逆变侧对电网电压幅值的追踪;锁相环则可实现变流器逆变侧对电网电压相位的跟踪;此外,还需采用增加或减少变流器逆变侧输出电压频率的方法,保证相位一致。

根据GB/T 15945—1995《电力系统频率允许偏差》规定,电压频率波动范围需 $< 0.2$  Hz。为了缩短调频时间,并保证频率变化率在负载可接受的范围内,采用图6所示的控制算法。为了避免当相位差接近 $\pi$ 时,频率变化量在 $+0.2$  Hz~ $-0.2$  Hz之间反复变化,在 $\pi$ 附近增加了一个小滞环。

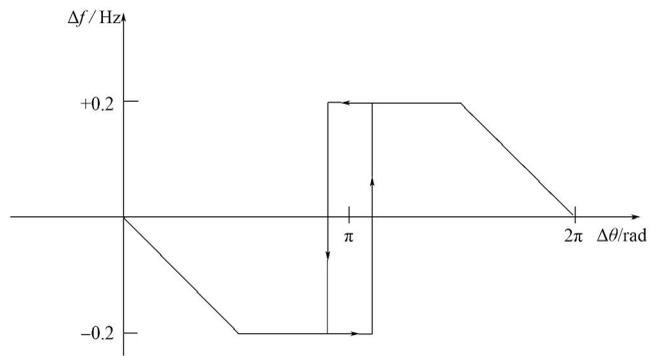


图6 分布式发电系统与电网同步调频示意图

Fig. 6 Schematic of frequency synchronization method between distributed generation system and the grid

4 实验验证

为了验证分布式发电系统离/并网柔性切换技术的有效性和正确性,搭建了一套分布式发电模拟系统装置。实验系统的主要电气参数:额定功率为5 kW,滤波电感为2.5 mH,滤波电容为20  $\mu$ F,本地负载采用3个10电阻星形接法来模拟。电网故障由电压跌落发生器模拟产生。

图7是在理想电网电压条件下变流器有功功率跳变的实验结果。控制中采用电网电压综合矢量定向控制策略,其中变流器逆变侧在初始阶段向电网发出有功功率为1 kW,无功功率为0 var,此时变流器输出正弦电流,三相平衡,且直流母线电压稳定。一段时间后,修正有功功率指令,使向电网发出的有功功率从1 kW阶跃到3 kW。可以看出,在输出功率跳变时,变流器直流侧电压 $U_d$ 基本上没有波动,变流器呈现良好的动态性能。

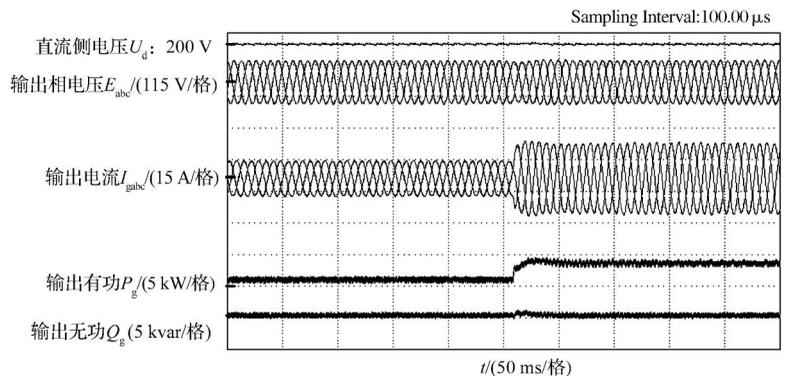
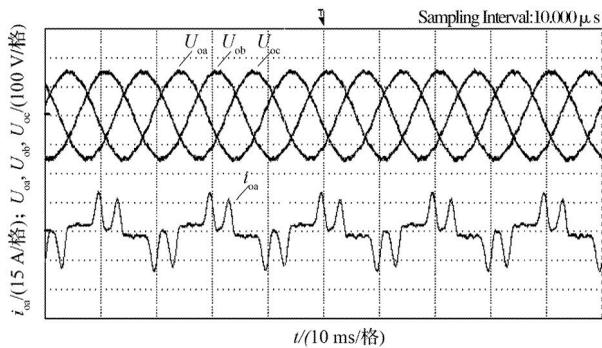


图7 基于电网电压定向的变流器实验波形

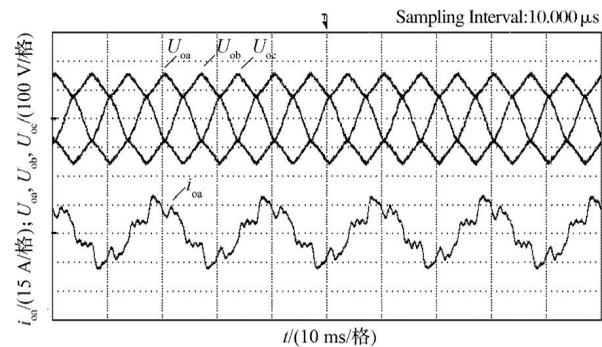
Fig.7 Experimental waveforms of grid side inverter based on grid voltage orientated control strategy

图8是离网运行时变流器接500 W非线性负载采用PIR和双PI控制策略的实验波形,其中图8(a)在比例-

积分-谐振控制中引入六倍频谐振控制器,以抑制输出电压中的5、7次谐波电压分量。此时,输出电压的电压畸变率(THD)为1.83%,而负载电流畸变率(THD)为90.1%。图8(b)是采用传统双PI控制策略的输出电压和负载电流的波形,此时输出电压的THD为6.66%。可见,在非线性负载的情况下采用比例-积分-谐振调节器可较好地控制输出电压。



(a) 用PIR控制的情况  
(a) Test result with PIR control

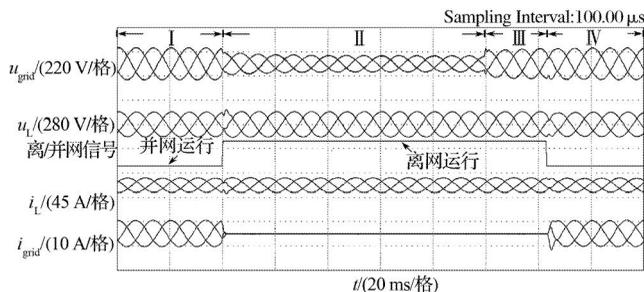


(b) 用双PI控制的情况  
(b) Test result with dual PI control

图8 离网运行非线性负载下分别采用PIR控制策略和双PI控制策略的实验波形

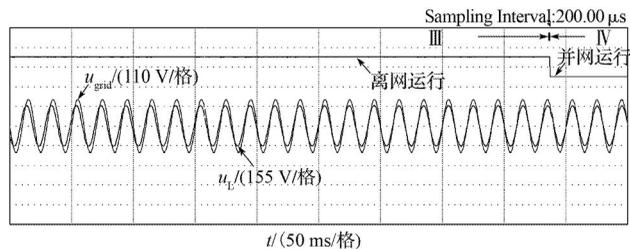
Fig.8 Experimental waveforms of inverter disconnected to grid with nonlinear load based on control strategy of PIR and dual PI

图9是电网发生三相电压跌落故障时,分布式发电系统离/并网柔性切换运行的实验波形。图中, $u_{grid}$ 是升压变压器低压侧的电网电压; $u_L$ 为负载电压; $i_L$ 为负载电流; $i_{grid}$ 是电网电流。图9(a)中,在时间段I,分布式发电系统处于并网运行状态,此时已切换至电流闭环控制模式;在时间段II,分布式发电系统处于离网运行状态,此时已切换至电压闭环控制模式。图9(b)为离网运行切换至并网运行,分布式发电系统输出的负载电压追踪电网电压的过程波形。从图9中可以看出,整个状态切换过程中负载电压基本无变化,说明所采用的控制策略行之有效。



(a) 电网故障过程的波形

(a) Waveforms in the process of grid faults



(b) 负载电压追踪电网电压

(b) Load voltage tracking the grid voltage

图9 电网故障下分布式发电系统离/并网柔性切换实验波形

Fig.9 Experimental waveforms of distributed generation system while connecting and disconnecting to the grid when voltage fault occurs

### 5 结语

本文主要研究了新能源分布式发电系统并网与离网运行的柔性切换技术。在分析分布式发电系统并网运行和离网运行控制技术基础上,叙述了分布式发电系统并网运行与离网运行的切换过程,提出了实现并/离网柔性切换的控制策略,并对该控制策略进行了实验验证。实验表明,采用本文所提出的控制策略能使新能源分布式发电系统的负载电压在并网与离网的切换过程中基本无变化,系统呈现良好的离/并网柔性切换运行能力。

### 参考文献:

- [1] Thomas A, Goran A, Lennart S. Distributed generation: a definition [J]. Electric Power Systems Research, 2001, 57(3): 195-204.
- [2] Frede Blaabjerg, Chen Zhe, Soeren B K. Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2004, 19(5): 1184-1194.
- [3] IEEE Standards 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resource with Electric Power System[S]. 2003.
- [4] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1996, 143(3): 231-241.
- [5] 胡家兵,贺益康,郭晓明,等.不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制[J].电力系统自动化,2007,31(14): 47-56.

## 4 工程应用效果

宜万电气化铁路末端网压提升装置于2010年12月投运,如图5所示,户外放置的是集合式电容器、电抗器和晶闸管阀室等,这是国内首套用于电气化铁路供电臂末端进行网压提升的TCR型动态无功补偿装置。该装置投运后,在SS4型机车双机上坡运行工况下,可将供电臂网压抬高2.5 kV;在轻负荷(SS9型机车双机、动车组重联)或无负荷条件下,使供电臂末端网压不高于牵引变电所母线额定电压;同时供电系统月平均功率因数保持在0.99以上,如表1所示。



图5 网压提升装置现场图

Fig. 5 Field diagram of grid-voltage improving equipment

表1 补偿前后电压和功率因数的对比

Tab. 1 Contrast of the voltage and power factor before and after compensation

名称	补偿前	补偿后
重载时,供电臂末端电压/kV	19.5	22
空载时,供电臂末端电压/kV	29	29
月平均功率因数	0.82	0.99

### (上接第34页)

- [6] Hu Jiabing, He Yikang. Modeling and enhanced control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions[J]. Electronic Power Systems Research, 2009, 79(2): 273-281.
- [7] Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg. Flexible Control of Small Wind Turbines With Grid Failure Detection Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1323-1332.
- [8] Lie Xu, Andersen B R, Cartwright P. VSC Transmission System Operation Under Unbalanced Network Condition-Analysis and Control Design[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(1): 427-434.
- [9] 张兴,陈玲,杨淑英,等. 离网型小型风力发电系统逆变器的控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 95-98.
- [10] 林金燕,王正仕,陈辉明,等. 一种高性能三相四桥臂逆变器控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 101-105.
- [11] 曾嵘,年珩. 离网型风力发电系统逆变器控制技术[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 5-6.

## 5 结语

本文理论分析了供电臂末端电压偏低的主要原因,探讨了在供电臂末端进行补偿的优越性,提出了在供电臂末端装设TCR型动态无功补偿装置的方法来提升末端网压,并对该方案的原理、特点、实施策略和效果进行了阐述。投运效果表明:直挂式TCR装置和FC装置相互配合,可以实现对负荷无功电流的就地动态补偿,负荷无功电流在最短距离内得到平衡、线损最小,稳定了牵引网电压;重载时将供电臂末端电压提升了2.5 kV,系统功率因数保持在0.99以上;同时,FC装置滤除了线路中的谐波,提高了系统的电能质量,保证了线路的通过能力,提高了经济效益。

### 参考文献:

- [1] 吴凤娟. 重载铁路牵引供电系统改造方案浅析[J]. 铁道标准设计, 2005(12): 85-87.
- [2] 武玉明,张春燕. 牵引网电压过低的解决方案[J]. 电气化铁道, 2006(4): 14-16.
- [3] 林忠良. 晶闸管投切电容器装置在川黔线改造中的应用[J]. 电气化铁道, 1999(2): 14-15.
- [4] 李春清,王志刚,范中,等. 大秦线延庆一下庄供电臂电压偏低的解决方案[J]. 电气化铁道, 2004(5): 14-17.
- [5] 孔德兵,阮彦斌. 线路无功流向与首末端电压的关系[J]. 云南电力技术, 2009, 37(6): 15-17.

### (上接第29页)

- [3] 李志勇,冯江华. 智能型光伏微电网及其N+1控制模式研究[J]. 大功率变流技术, 2010(5): 29-32.
- [4] 任雁铭,秦立军,杨奇逊. IEC61850通信协议体系介绍和分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 62-64.
- [5] IEC 61850-7-420 Communications Systems for Distributed Energy Resource(DER): Logical Nodes (Draft for Vote) [S], 2006.
- [6] 王磊. 电子式电流互感器数字接口研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2006.
- [7] 国家电网公司科技部. 国家电网公司数字化变电站技术研讨会会议资料[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [8] IEC61850 Communication Networks and Systems in Substation: Part 7-1: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment—Principles and Models[S], 2006.
- [9] 黄灿英. 基于IEC61850标准的合并单元的研制[D]. 西安:西安科技大学, 2008.
- [10] IEC61850 Communication Networks and Systems in Substation: Part 7-2: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment—Abstract Communication Service Interface[S], 2006.
- [11] IEC61850 Communication Networks and Systems in Substations: Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) mapping to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3[S], 2006.