

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.008

# 基于新型统一电能质量控制器的光伏电站故障穿越技术

滕欣元<sup>1</sup>, 葛雪峰<sup>2</sup>, 张宸宇<sup>2</sup>, 陈雯嘉<sup>2</sup>, 史明明<sup>2</sup>, 王博仑<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410015;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**近年来,光伏电站低电压穿越技术得到了快速发展,但受限于光伏并网系统电压检测速度影响,光伏电站故障穿越的快速性等问题亟需解决。文中提出一种适用于光伏电站故障穿越的新型统一电能质量控制器(UPQC)接入结构及控制方法。该型UPQC能够在高电压故障时,通过补偿使光伏电站出口电压稳定在额定值,系统具备高电压穿越的能力,并兼有谐波补偿功能,有助于光伏电站快速响应电网电压波动情况,提升光伏电站故障穿越能力。UPQC可以配合光伏电站在低电压故障时输出无功功率,帮助光伏电站在指定的时间内发出电网需要的无功功率,并且能够在高电压故障时吸收电网无功功率,加速电网电压恢复过程,综合提升光伏电站穿越能力。最后,文中给出100 MW光伏电站运行仿真结果,验证了所提电力电子补偿系统的有效性和可行性。

**关键词:**统一电能质量控制器;光伏电站;故障穿越;无功补偿;谐波补偿

**中图分类号:** TM711

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2019)06-0055-06

## 0 引言

近年来,国内光伏电站装机总容量不断增加,大型集中式光伏发电系统对电力系统的影响越来越大<sup>[1-2]</sup>。光伏电站的离并网对电网的频率和幅值影响不容忽视。近年开始实施的《光伏电站接入电力系统技术规定》中规定了大中型光伏电站应具有低电压穿越能力,同时要具有穿越最大为1.3倍额定电压的高电压故障能力<sup>[3]</sup>,并且规定了苛刻的光伏电站快速响应电网无功需求的时间要求。研究者针对风机的高电压穿越问题提出了一系列的控制算法<sup>[4-6]</sup>,利用静止同步无功补偿器向电网吸收无功以保持故障时风机变换器出口电压不变,而变换器输出电压的保持能力取决于线路电抗大小;一般光伏逆变器出口与公共耦合点(point of common coupling, PCC)间的电抗较小,需要非常大的无功源容量才能保持电网电压稳定<sup>[7]</sup>。文献[8-10]提出了基于动态电压补偿器(dynamic voltage restorer, DVR)补偿的可再生能源故障穿越系统,但其直流链需要蓄电池,DVR所需储能容量较大,经济性较差。

串并联多功能复用的统一电能质量控制器(unified power quality conditioner, UPQC)可有效实现新能源并网系统故障穿越<sup>[11-12]</sup>。UPQC为背靠背型电力电子变换器,串、并联侧输出电压等级差别

较大,因此,有源滤波器(active power filter, APF)部分多串联升压变压器。文中提出一种适用于并网光伏电站故障穿越的新型UPQC接入结构及其控制方法。该型UPQC跨接在工频变压器两侧:串联DVR部分接入高压电网,并联APF接入低压系统,该结构具有串联DVR部分通态电流小,并联部分输出电压小的综合优势。该UPQC可补偿电网基波电压幅值突升从而维持光伏电站出口电压为额定值,满足光伏电站高电压穿越要求。随着非线性负载的增加以及高压直流输电系统的影响,部分输配电网电压谐波含量较高,甚至超过10%<sup>[11-12]</sup>。新型UPQC可补偿电网电压谐波,改善光伏并网逆变器锁相环(phase locked loop, PLL)的检测速度和精度;并可在高/低电压故障时输出无功功率,配合光伏电站在指定时间内发出国标要求的无功容量,帮助恢复电网电压。

文中首先介绍了适用于光伏故障穿越的新型UPQC结构,并详述了其工作原理;在此基础上分别阐述了新型UPQC串联DVR部分、并联APF部分的控制策略;最后通过仿真100 MW的光伏并网系统验证了该UPQC系统的有效性和可行性。

## 1 适用于光伏电站故障穿越的UPQC

图1为适用于大中型光伏电站故障穿越的新型UPQC接入结构,由串联侧的DVR及并联侧的APF组成。APF部分接入光伏电站出口变压器的35 kV低压侧,DVR部分串联在110 kV高压侧。该型UPQC具有以下优点:(1)串联在高压侧的DVR,其

收稿日期:2019-06-13;修回日期:2019-07-17

基金项目:国家重点研发计划资助项目“基于电力电子变压器的交直流混合可再生能源技术研究”(2017YFB0903300)

工作电流较低;(2) 并联在低压侧的 APF 输出电压较低,且经 DVR 补偿后 APF 不会出现过调制。新型 UPQC 可以补偿电压暂升、电压谐波,同时提供无功支撑。可以实现:(1) 补偿高电压故障,在不改造光伏逆变器硬件的前提下实现高电压穿越并维持光伏变换器的安全运行;(2) 补偿电压低次谐波,光伏逆变器控制系统的 PLL 检测到的为谐波含量较低的信号,避免了数字滤波导致的延时,从而提高 PLL 的检测速度、精度及光伏电站在复杂电网故障时的响应速度;(3) 低电压故障时 APF 快速发出感性无功,配合光伏电站在指定时间内发出国标要求的感性无功;(4) 高电压故障时吸收感性无功以帮助恢复电网电压。

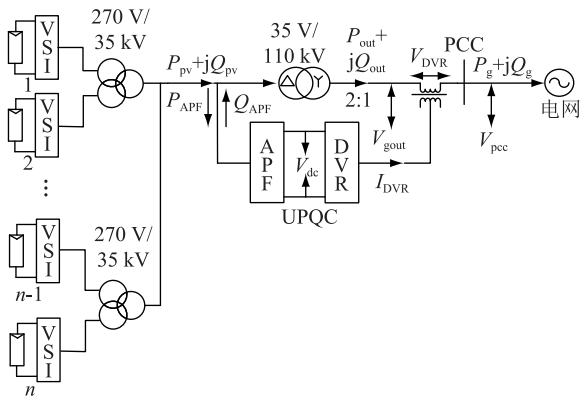


图1 新型 UPQC 接入结构

Fig.1 A novel UPQC access structure

串联 DVR 部分的控制系统实现以下功能:(1) 电网高电压故障(电压幅值不高于 1.3 倍的额定电压)时补偿光伏出口电压使其为额定值;(2) 消除 PCC 侧电压谐波,提高光伏电站出口侧电压电能质量,从而提高光伏电站内部并网逆变器的运行性能。

图 2 为 DVR 控制系统,其需要测量的量及作用如下:(1) 光伏电站出口变压器输出电压  $V_{gout}$ ,用于电压反馈控制;(2) PCC 处电压  $V_{PCC}$ ,用于检测电压跌落;(3) DVR 部分输出三相电流  $I_{DVR}$ ,避免 UPQC 系统发生过电流。

如图 2 所示,DVR 控制系统的高电压补偿回路以及谐波补偿部分并联运行产生脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM) 信号。高电压补偿回路在电网高电压故障时动作,补偿基波幅值以及谐波分量,并且低电压故障时不动作;谐波补偿回路一直保持运行状态,补偿电网指定次谐波。

## 2 串联 DVR 部分控制策略

电网发生高电压故障(包括三相对称故障与不对称故障),DVR 通过注入相应的电压相量来保持

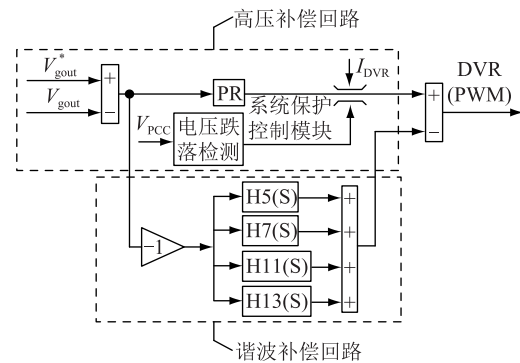


图2 DVR 控制框图

Fig.2 DVR control system

输出电压  $V_{gout}$  为额定值。参考电压  $V_{gout}^*$  与采样反馈电压  $V_{gout}$  相减产生三相电压误差信号,再经比例谐振控制器(proportional resonant, PR) 输出三相调制参考信号。 $V_{gout}^*$  为幅值和相位已知的三相电压参考信号,其幅值和相位与电网正常运行时的基波分量一致。高压补偿回路输出的调制参考信号与谐波补偿的调制参考信号叠加产生 DVR 部分的调制参考信号。文中采用 PR 调节器,能够同时实现基波电压的正负序控制,表达式如式(1)所示,其中  $\omega_0$  为基波频率。采用上述高电压补偿策略时,当 PCC 电压高于额定值,DVR 开始补偿电压差。系统无需检测电压暂升,实现无延迟的补偿。

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{k_1 s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中: $k_p, k_1$  为 PR 调节器的比例谐振参数; $s$  为复变量。低电压故障时切除高压补偿回路,防止因 DVR 补偿基波电压跌落而造成系统过流,其检测电压跌落方程由式(2)确定。利用上述检测方法,PCC 处的电压在额定电压值左右波动时也可能导致系统切除高压补偿回路,而上述情况不影响 DVR 对于谐波和高电压的补偿。

$$u_{error} = V_{PCC,ref} - |V_{PCC}| \geq u_{Threshold} \quad (2)$$

$$|V_{PCC}| = \sqrt{V_{PCC,d}^2 + V_{PCC,q}^2} \quad (3)$$

式中: $V_{PCC,ref}$  为 PCC 点电压参考值; $V_{PCC,d}, V_{PCC,q}$  分别为 PCC 点电压的  $d, q$  分量; $u_{Threshold}$  为电压阈值。低电压故障后高压补偿回路不工作,系统利用谐波补偿回路来消除电网侧的低次谐波。如图 2 所示,谐波补偿部分使用并联谐振控制器来补偿指定的 5, 7, 11, 13 次谐波电压,从而降低流向 UPQC 的功率。谐振控制器的表达式如式(4)所示:

$$H_n(s) = 2K_1 \omega_c \frac{s + \omega_c}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2 + \omega_c^2} \quad (4)$$

式中: $K_1$  为增益; $\omega_c$  为截止频率; $\omega_n$  为指定的谐波频率。如图 3 所示,并联谐振控制器在指定的谐波频

率下均有较大的增益,而其他频率下的增益几乎为0,该控制回路可有效消除电网侧指定次谐波。

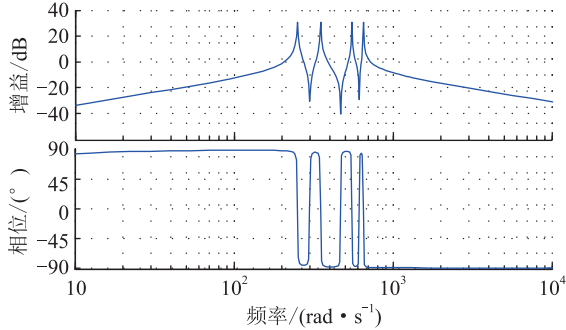


图3 并联谐振控制器伯德图  
Fig.3 Bode diagram of the selective harmonic regulators

### 3 并联 APF 部分控制策略

并联 APF 部分主要是维持 UPQC 直流链电容电压的稳定并且充当快速无功发生器。在 UPQC 容量的限制范围内,APF 部分在低电压故障时发出一定的无功功率并在电网高电压故障时吸收电网无功功率。为了实现上述无功补偿功能,系统采取  $dq$  分解法控制 APF 的输出电流。忽略 UPQC 的损耗,当流入 APF 的有功功率  $P_{APF}$  等于 DVR 发出的有功功率  $P_d$  时,UPQC 的直流链电容电压稳定;而当  $P_{APF} > P_d$  时,直流链电容被充电,直流链电压持续上升;同理  $P_{APF} < P_d$  时,直流链电容电压下降。APF 部分的有功电流参考信号可由直流链电容电压与参考电压信号的差值经 PI 控制器调节后产生,PI 控制器表达式如式(5)所述;无功电流参考信号与 PCC 处的电压跌落/升高幅度相关,下文将具体阐述其补偿策略。控制结构如图4所示,上述 APF 的有功/无功参考电流信号分别与实测得的 APF 输出电流  $dq$  分量比较后经 PI 调节器产生调制波<sup>[13-17]</sup>,进而产生 PWM 调制信号去触发相应的半导体开关。

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (5)$$

式中: $k_p, k_i$ 为 PI 调节器的比例积分参数。

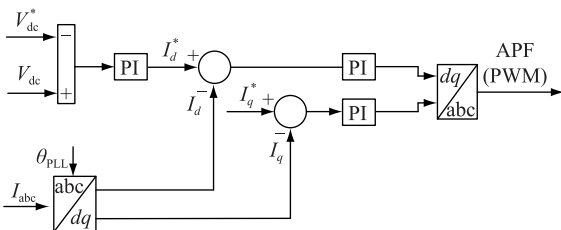


图4 APF 部分控制框图  
Fig.4 APF control system

### 3.1 低电压故障下的无功补偿策略

低电压故障时,DVR 不补偿电压跌落,UPQC 不传送有功功率,APF 全发无功。APF 发无功的速度优于光伏电站,则电压跌落深度较低时,由 APF 发感性无功,光伏电站不发无功;电压跌落较深,APF 配合光伏电站一起发无功。图5(a)为国标中规定的电网低电压故障时光伏电站要求发出的无功电流分量<sup>[3]</sup>,则 APF 和光伏电站应输出的无功电流分量分别如图5(b),(c)所示。

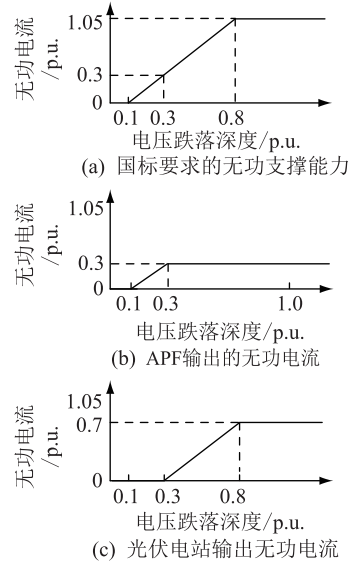


图5 无功补偿电流

Fig.5 Output reactive current

APF 的无功电流参考信号  $I_q^*$  以及光伏电站的电流参考信号  $I_{dref}, I_{qref}$  如下:

(1) 网侧电压  $0.9 - 2H/3 < k_1 \leq 0.9$ :

$$\begin{cases} I_q^* = -1.5(0.9 - k_1)I_N \\ I_{qref} = 0 \\ I_{dref} = I_N \sqrt{1 - 2.25(0.9 - k_1)^2} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 网侧电压  $0.2 < k_1 \leq 0.9 - 2H/3$ :

$$\begin{cases} I_q^* = -HI_N \\ I_{qref} = I_N[-1.5(0.9 - k_1) + H] \\ I_{dref} = I_N \sqrt{\max\{[1 - 2.25(0.9 - k_1)^2], 0\}} \end{cases} \quad (7)$$

(3) 网侧电压  $k_1 \leq 0.2$ :

$$\begin{cases} I_q^* = -HI_N \\ I_{qref} = -1.05I_N + HI_N \\ I_{dref} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $H$ 为 DVR、APF 容量标幺值(基准值为光伏电站的额定容量  $S_n$ ); $k_1$ 为 PCC 处电压标幺值,其基准值为电网电压的额定值。利用文献[18]的方法计算出 PCC 三相电压的幅值和相角,判断故障类型并

进一步计算出  $k_1$  (三相和两相故障考核的电压为线电压,单相故障为相电压)。

### 3.2 高电压故障下的无功补偿策略

DVR 补偿高电压故障之后的电压  $V_{gout}$  与 PCC 处的正序电压同相位, DVR 在发有功的同时也吸收电网感性无功。则:

$$S_{out} = P_{out} + jQ_{out} = \frac{1}{k_1^+} (P_g + jQ_g) \quad (9)$$

$$Q_g = k_1^+ (Q_{pv} + Q_{APF}) = k_1^+ Q_{APF} \quad (10)$$

式中:  $S_{out}$ ,  $P_{out}$ ,  $Q_{out}$  分别为光伏出口变压器的输出视在功率、有功以及无功功率;  $Q_{pv}$ ,  $Q_{APF}$ ,  $Q_g$  分别为光伏电站、APF 和注入电网的无功功率。

利用文献[19—20]的幅值检测方法,当 PCC 处电压不小于 1.1 倍的额定电压时,控制 APF 吸收感性无功。在满足 APF 不过载的前提下,APF 吸收无功功率,无功电流参考信号如下:

$$I_q^* = I_N \sqrt{H^2 - 0.053} \quad 1.1 \leq k_1 \leq 1.3 \quad (11)$$

即高电压故障时 APF 向电网发出恒定大小的无功。

## 4 仿真分析

为验证所提光伏电站 UPQC 接入结构的运行性能,采用 Matlab/ Simulink 进行仿真。搭建如图 1 所示的 100 MW 光伏电站并网模型,UPQC 的容量为 30 MV·A。每个逆变器的电源为 500 kW 的光伏阵列,各三绕组变压器额定功率为 1 MW。500 kW 光伏阵列采用文献[21]仿真模型,表面温度为 25 °C,光照强度为 1 kW/m<sup>2</sup>。每个电源短路电流 1 269 A,开路电压 527 V;最大工作点电压为 457 V,工作电流 1 095 A。仿真模型中光伏逆变器经 270 V/35 kV 变压器汇流,再经光伏电站 35 kV/110 kV 出口变压器接入 110 kV 电网。

### 4.1 电网电压谐波补偿

文中分析了电网正常运行、低电压故障、高电压故障 3 种情形下的谐波补偿情形。PCC 处以及补偿后的光伏电站出口电压谐波含量如表 1 所示,其中  $\eta_{THD}$  为总谐波畸变率,经 DVR 补偿后  $V_{gout}$  的低次谐波含量较低。图 6 为电网正常运行情形下的 PCC 处和光伏电站出口的电压,电网含有 5, 7, 11, 13 次谐波而导致 PCC 处电压波形畸变,经 DVR 补偿后其光伏电站出口电压波形接近正弦。图 7 和图 8 分别仿真了表中低电压以及高电压故障前后 PCC 处和光伏电站出口处电压波形。如图 7 所示,电网电压在 0.02 s 后跌落到 0.8 p.u.,经 DVR 补偿后并网逆变器出口侧的电压谐波含量均保持在 1% 左

右。图 8 为电网电压在 0.02 s 升高到 1.2 p.u.,可以看出电网故障以及 DVR 补偿电压升高的情形不影响 DVR 补偿谐波,110 kV 变压器高压侧的电压波形谐波含量较低。

表 1 DVR 谐波补偿仿真结果

Table 1 The harmonic compensation result of the DV

电网状态	电压测量值	5th	7th	11th	13th	$\eta_{THD}/\%$
正常运行	$V_{PCC}$	5.0	5.0	4.0	4.0	9.1
	$V_{gout}$	0.2	0.4	0	0	0.9
低压故障前	$V_{PCC}$	5.0	5.0	4.0	4.0	9.1
	$V_{gout}$	0.3	0.2	0.1	0.1	1.0
低压故障	$V_{PCC}$	6.3	6.3	5.0	5.0	11.3
	$V_{gout}$	0.1	0.6	0	0.1	1.2
高压故障	$V_{PCC}$	4.2	4.2	3.3	3.3	7.6
	$V_{gout}$	0	0.1	0.1	0.1	1.0

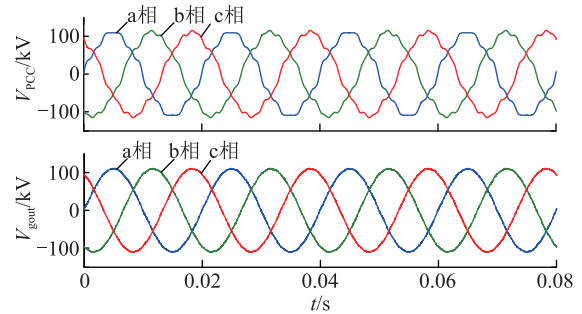


图 6 无故障下的谐波补偿

Fig.6 Voltage harmonic compensation in normal condition

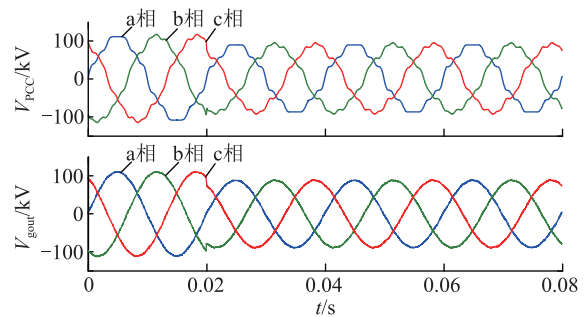


图 7 低电压故障下的谐波补偿

Fig.7 Voltage harmonic compensation in low voltage condition

### 4.2 低电压故障时的无功补偿

低电压故障时,电网电压跌落幅度小于 0.3 p.u.时,APF 发无功,光伏逆变器全发有功;跌落幅度大于 0.3 p.u.时,APF 发出  $0.3I_N$  的无功电流,光伏电站按式(7)和式(8)发无功,其中  $H$  等于 0.3。

图 9 为电网电压跌落至 0.4 p.u.的情形,根据国标,光伏电站应向电网注入  $0.75I_N$  的无功电流,即发出 30 MV·A 的无功。如图 9 所示,零时刻发生故障,

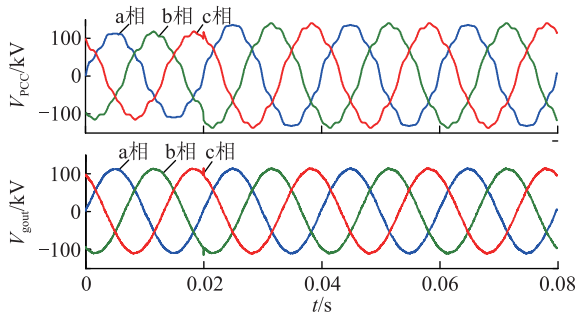


图 8 高电压故障下的谐波补偿  
Fig.8 Voltage harmonic compensation in high voltage condition

APF 发  $0.3I_N$  的无功电流,即  $12 \text{ MV}\cdot\text{A}$  的无功,光伏电站发出  $18 \text{ MV}\cdot\text{A}$  的无功。

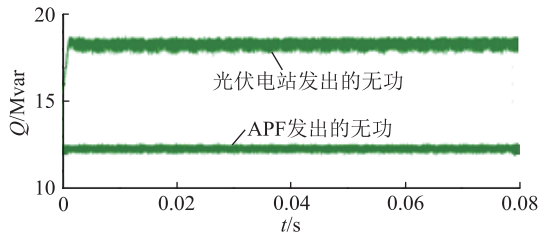


图 9 低电压故障下的无功补偿  
Fig.9 Reactive power compensation in low voltage

### 4.3 高电压故障下的电压与无功补偿

图 10(a)为零时刻电网发生三相故障,电压升高到  $1.2 \text{ p.u.}$ 。图 10(b)中光伏电站出口电压仍保持额定幅值不变;DVR 三相电压如图 10(c)所示,其注入的补偿电压动态响应和暂态响应较好。

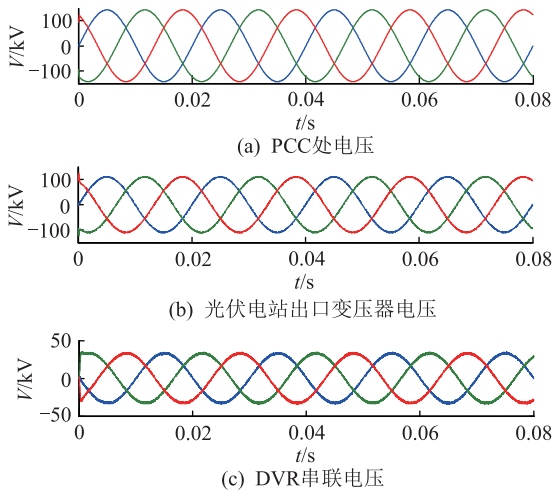


图 10 高压故障下的仿真波形  
Fig.10 Waveforms under high voltage condition

光伏并网系统的输出有功功率如图 11 所示,光伏电站发  $100 \text{ MW}$  有功,其中约  $16.7 \text{ MW}$  流入 APF 和 DVR,光伏出口变压器的输出有功约为  $83 \text{ MW}$ 。APF 按照式(11)吸收感性无功功率,仿真模型的  $H$  等于  $0.3$ ,则 APF 可吸收标么值为  $0.19$  的无功功率。

图 12 为高电压故障下 APF 以及 DVR 向电网吸收的无功功率,其中 APF 提供约  $19 \text{ MV}\cdot\text{A}$  的无功功率支撑,则 UPQC 总计向电网吸收约  $23 \text{ MV}\cdot\text{A}$  的感性无功功率。上述  $1.2 \text{ p.u.}$  的高电压故障,APF 的视在功率约为  $17.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ,注入光伏出口变压器的视在功率约为  $83.1 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ,则在此补偿策略下,系统不会出现过载情形。

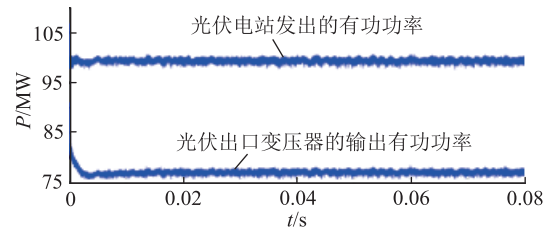


图 11 光伏并网系统有功功率  
Fig.11 The output active power of grid-tied PV system

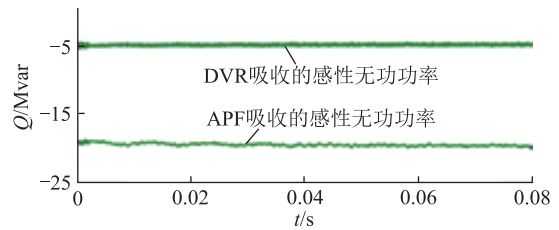


图 12 APF 和 DVR 输出无功功率  
Fig.12 Output reactive power of APF and DVR

## 5 结语

文中提出了一种新型的适用于光伏电站故障穿越的 UPQC 接入结构及控制方法,该型 UPQC 可补偿电网过电压,满足光伏电站高电压穿越要求;UPQC 可补偿电网电压的低次谐波分量,提高光伏并网逆变器的故障检测速度和光伏电站在复杂电网故障时的响应速度;并且 UPQC 可提供无功补偿功能,快速恢复电网电压。由此可见,该型 UPQC 可提升光伏电站故障穿越的响应速度,具备高电压穿越和快速无功支撑能力,可综合提升光伏电站故障穿越能力,具备一定的应用潜力。

### 参考文献:

[1] 郭勇,李勇,皇甫星星,等. 两级式光伏发电系统低电压穿越控制策略研究[J]. 电力工程技术,2017,36(6):7-13.  
GUO Yong, LI Yong, HUANGFU Xingxing, et al. LVRT control strategy of two-stage PV power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(6):7-13.

[2] 董金楚,黎嘉明,徐沈智,等. 大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响[J]. 电力工程技术,2017,36(1):1-8.  
DONG Jinchu, LI Jiaming, XU Shenzhi, et al. Probabilistic load flow calculation and influence analysis for power grid connected with large scale photovoltaic generation system[J]. Elec-

- tric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):1-8.
- [3] 光伏电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2012 [S]. 北京:中国标准出版社,2013.  
Technical provisions for photovoltaic power station access power system; GB/T 19964 —2012 [S]. Beijing: China Standard Press, 2013.
- [4] WESSELS C, FUCHS W. High voltage ride through with FACTS for DFIG based wind turbines [C] // Proceedings of 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'09), 2009, Barcelona, Spain:1-10.
- [5] ALHARBI Y M, SHIDDIQ Y A M, ABU-SIADA A. Application of STATCOM to improve the high-voltage-ride-through capability of wind turbine generator [C] // Proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technology, 2011, Perth, Australia:1-5.
- [6] JOVICA V, MILANOVIĆ, ZHANG Yan. Modeling of FACTS devices for voltage sag mitigation studies in large power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4):3044-3052.
- [7] JAYANTI N G, BASU M, CONLON M F, et al. Rating requirements of the unified power quality conditioner to integrate the fixed-speed induction generator-type wind generation to the grid [J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(2):133-143.
- [8] 凌禹. 动态电压恢复器在双馈风电机组故障穿越中的应用 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(4):1156-1164.  
LING Yu. Application of dynamic voltage restorer in fault ride through of doubly-fed wind turbine [J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(4):1156-1164.
- [9] 凌禹, 窦真兰. 基于 DVR 的双馈风电机组不对称电压故障穿越 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2):65-70.  
LING Yu, DOU Zhenlan. Asymmetrical voltage fault ride-through of wind turbine with DFIG using DVR [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):65-70.
- [10] 许建兵, 江全元, 石庆均. 基于储能型 DVR 的双馈风电机组电压穿越协调控制 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4):14-20.  
XU Jianbin, JIANG Quanyuan, SHI Qingjun. Coordinated control of voltage ride through for DFIG wind turbine systems using energy-based DVR [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4):14-20.
- [11] 胡志帅, 任永峰, 韩俊飞, 等. 适用于双馈风电系统的九开关型统一电能质量调节器 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6):105-112.  
HU Zhishuai, REN Yongfeng, HAN Junfei, et al. Nine-switch unified power quality conditioner based on DFIG wind power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6):105-112.
- [12] 尹靖元, 武文, 吴理心, 等. 串并联多功能复合控制器拓扑结构研究 [J]. 电网技术, 2019, 43(2):562-569.  
YIN Jingyuan, WU Wen, WU Lixin, et al. Topology research of series-parallel multi-function composite controller [J]. Power System Technology, 2019, 43(2):562-569.
- [13] FARIVAR G, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Decoupled control system for cascaded H-Bridge multilevel converter based STATCOM [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2016, 63(1):322-331.
- [14] CHEN H C, WU P H, LEE C T, et al. Zero-sequence voltage injection for DC capacitor voltage balancing control of the star-connected cascaded H-Bridge PWM converter under unbalanced grid [J]. IEEE Transaction on Industrial Application, 2016, 51(6):4584-4594.
- [15] HATANO N, ISE T. Control scheme of cascaded H-Bridge STATCOM using Zero-Sequence voltage and negative-sequence current [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2010, 25(2):543-550.
- [16] CHEN H C, WU P H, LEE C T, et al. A flexible DC voltage balancing control based on the power flow management for star-connected cascaded H-Bridge converter [J]. IEEE Transaction on Industrial Application, 2016, 52(6):4946-4954.
- [17] 赵波, 郭剑波, 周飞. 链式 STATCOM 相间直流电压平衡控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34):36-41.  
ZHAO Bo, GUO Jianbo, ZHOU Fei. Phase-to-phase DC voltage balance control strategy of chain STATCOM [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34):36-41.
- [18] 徐宏雷, 郑伟, 周喜超, 等. 特高压直流输电系统对电网谐波污染的仿真分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23):192-195.  
XU Honglei, ZHENG Wei, ZHOU Xichao, et al. Simulation analysis of grid harmonic pollution affected by ultrahigh voltage direct current power transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23):192-195.
- [19] 曾江, 于文俊, 余涛. 东莞配电网谐波测量及其统计分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24):167-171.  
ZENG Jiang, YU Wenjun, YU Tao. Harmonic survey and statistical analysis of distribution network in Dongguan [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24):167-171.
- [20] FITZER C, BARNES M, GREEN P. Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transaction on Ind. Application, 2004, 40(1):203-212.
- [21] PATEL H, AGARWAL V. Matlab-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3):302-310.

## 作者简介:



滕欣元

滕欣元(1998),男,本科在读,研究方向为电气工程及其自动化;

葛雪峰(1990),男,博士,工程师,从事电力电子补偿装置及其在配网中的应用工作(E-mail:gexuefeng.2008@163.com);

张宸宇(1989),男,博士,高级工程师,从事交直流电网电能质量治理工作。

(下转第98页)

## Short-term load forecasting in a certain area based on EEMD-GABP

GUO Weilin<sup>1</sup>, JIANG Xiaoyan<sup>1</sup>, LUO Yi<sup>1</sup>, HAN Qin<sup>1</sup>

(Agricultural and Animal Husbandry College of Tibet, Nyingchi 860000, China)

**Abstract:** Power system load is a nonlinear, non-stationary time series of load with typical periodicity and randomness. In order to reduce the nonlinearity of the load sequence and improve the prediction accuracy, a lumped empirical mode decomposition method (EEMD) and a modified artificial neural network (GABP) short-term load forecasting method are proposed. Using EEMD to decompose the load sequence into several stationary components of different frequencies, highlighting the local characteristics of the original load data, solving the classification fuzzy problem in EMD decomposition, and using GABP network to predict, solving the problem that BP is easy to fall into the local optimal solution. The appropriate parameters are used to construct different EEMD-GABP prediction models for each component, and the meteorological factors are introduced to predict each component separately, and the final predicted value is obtained after reconstruction. The example shows that the accuracy prediction high stability of load based on EMD-GABP prediction model is higher than that of traditional models such as ARIMA model and SVM model.

**Keywords:** short-term load forecasting; meteorological factor; ensemble empirical mode decomposition; genetic algorithm; back propagation

(编辑 杨卫星)

(上接第 60 页)

## A novel unified power quality conditioner for the fault ride-through operation of photovoltaic power station

TENG Xinyuan<sup>1</sup>, GE Xuefeng<sup>2</sup>, ZHANG Chenyu<sup>2</sup>, CHEN Wenjia<sup>2</sup>, SHI Mingming<sup>2</sup>, WANG Bolun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410015, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** A novel unified power quality conditioner (UPQC) and its control strategy for the fault ride-through operation of photovoltaic (PV) power station is present in this paper. The output voltage of PV station can be controlled to its rated value with the novel compensator under high grid voltage condition. The compensator could also compensate the grid harmonic voltage under various operation conditions, which can minimize the response time of phase-locked-loops embedded in the control loop of grid-tied PV inverter. The compensator helps the PV station output reactive power for enhancing the low voltage ride through performance. Moreover it absorbs reactive power from the grid in high voltage condition to support the grid voltage recovery, which could comprehensively improve the fault ride-through operation of photovoltaic power station. Furthermore, the performance of proposed compensator system with a 100 MW grid-tied PV station has been verified by Matlab/Simulink.

**Keywords:** unified power quality conditioner; photovoltaic station; fault ride-through; reactive power compensation; harmonic voltage compensation

(编辑 方晶)