

# 可参与微电网电能质量控制的 并网光伏逆变器研究

微电网中负载与电源类型多样, 电能质量指标可能会不满足要求, 为此提出利用光伏并网逆变器控制微电网电能质量的方法。检测逆变器接入点母线上的电压和所带负载三相电流, 使光伏并网逆变器除了输出有功功率以外, 还能根据电网的电能质量情况, 对负载谐波和不平衡电流进行实时跟踪补偿。基于瞬时无功功率理论, 提出了一种串联超前校正的谐波检测方法, 通过对检测系统传递函数的零点进行合理调整, 使其动态响应性得到有效改善。采用广义积分控制方法对交流参考电流进行跟踪控制, 可以达到稳态误差为零; 并针对传统广义积分控制方法频率鲁棒性差的问题进行了改进。通过PSCAD/EMTDC进行仿真验证, 结果表明, 所提控制策略可以准确地实现谐波与无功补偿, 有效降低了电压不平衡度, 对负载突变和频率波动有良好的适应性。

陈绍鑫 赵景峰 王径迤 支淼川 倪 佳/国网冀北电力有限公司物资分公司



陈绍鑫/高级工程师

近年来, 随着冀北电网的分布式电源建设和“金太阳示范工程”国家风光储示范工程在冀北电网安家落户, 微电网结构日益完善。微电网作为可控的供能系统, 既能并网运行, 又能独立自治运行, 得到越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。研究微电网的主要目的是提高分布式电源的渗透率, 以及为重要或敏感负荷提供高质量、可靠的电能。而微电网中大量逆变器以及非线性负载的存在, 使得微电网中谐波电流的含量较高。同时, 一些不平衡负载及电源的接入还会造成系统三相电压不平衡。此外, 微电网内一些电源或负载需要大量无功时, 而微电网内的无功供需不平衡, 也会造成电压波动或偏离。以上情况都会造成微电网和所接入配电网的电能质量恶化, 同时还会对并网逆变器的控制造成不良影响。因

此, 为了发挥微电网技术的优势, 减小微电网接入对电网电能质量的影响, 保证微电网的稳定与经济运行, 对微电网电能质量问题的研究具有重要意义。

针对微电网的电能质量问题, 目前的解决方案一般是采用专门的治理装置进行改善。微电网的谐波污染情况往往采用滤波装置进行改善, 现有滤波装置主要分为无源滤波和有源滤波两种; 而电压波动和闪变问题的改善主要依靠各种无功补偿装置, 如电容器和静止无功发生器等<sup>[3]</sup>。但专门的电能质量治理装置安装成本高, 功能单一, 并且容量利用率低, 经济性差, 推广难度较大。

由于光伏并网逆变器与有源电力滤波器、静止无功发生器在硬件结构和控制方法上有诸多相似点, 因而有学者提出了实现并网逆变器一体化控制系统, 在输出有功电能之外, 兼备某些电能质量调节功能<sup>[4-5]</sup>。利用光伏并网逆变器进行谐波抑制及无功补偿, 对微电网电能质量实现分散式补偿和控制, 可以减少建设投资, 对微电网电能质量进行有效调节<sup>[6-7]</sup>。

光伏并网逆变器要实现上述辅助功能, 对谐波电流检测技术与电流跟踪控制策略的研究将成为关键。目前, 基于瞬时无功理论的谐波检测法应用最为广泛, 但该算法由于使用滤波器, 电流检测存在延时, 实时性无法得到保证。为此本文研究了一种串联超前校正的谐波检测方法, 通过合理调整检测系统传递函数的零点, 有效改善其动态性能。同时针对利用PI控制器实现交流周期信号

## 关键词/Keywords

微电网·  
电能质量·  
并网逆变器·  
谐波检测·  
广义积分控制·

的无差跟踪比较烦琐的问题,提出采用广义积分控制器对谐波电流进行跟踪控制;并针对传统广义积分控制方法鲁棒性较差的问题进行了改进,实现对频率波动良好的适应性。

## 光伏并网逆变器控制系统

图1为光伏并网发电及电能质量控制系统,逆变器并网A点接有非线性及不对称负荷。通过控制光伏并网逆变器的电流输出,将A点电流补偿为三相对称的正序基波,从而能够有效抑制谐波,同时还可解决由于不对称负载导致的电压不平衡问题,是一种较为全面的补偿策略。并网逆变器要实现电能质量控制功能,首先需要快速准确地检测需要补偿的负载电流中的谐波、不平衡与无功分量;然后与有功参考电流叠加,求得并网逆变器总的输出参考电流;最后对参考电流进行实时准确的跟踪控制,从而实现对电能质量的有效补偿。

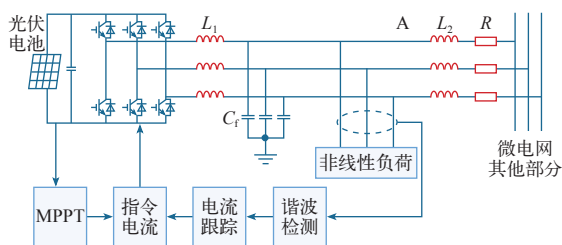


图1 光伏并网发电及电能质量控制系统

### 1. 谐波电流检测方法

基于瞬时无功理论的谐波检测法主要原理是通过三相电压和电流,根据瞬时无功理论,计算出相应的瞬时有功与无功分量,再利用低通滤波获取基波分量,最后将瞬时分量中的基波分量减掉,即可得到广义谐波电流(谐波、无功以不对称分量总和),如图2所示。

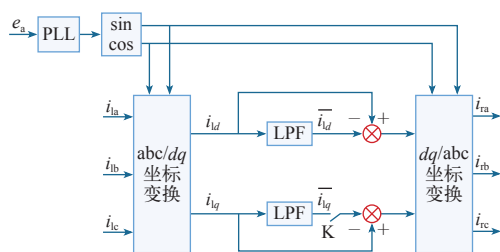


图2 基于瞬时无功理论的谐波检测法

负载电流 $i_{ia}$ 、 $i_{ib}$ 和 $i_{ic}$ 经过变换后得到 $i_{id}$ 、 $i_{iq}$ 。再经过低通滤波器(LPF),可以分别获得 $i_{id}$ 中的直流分量 $\bar{i}_{id}$ 和 $i_{iq}$ 中的直流分量 $\bar{i}_{iq}$ ,分别为基波有功及无功分量。最终得到的 $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 和 $i_{rc}$ 即为广义谐波电流。进而控制逆变器输出,将原来由微电网提供给负载的广义谐波电流转由逆变器提供,以实现就地补偿无功、抑制谐波及三相不平衡。开关K打开与否,决定是否对负载电流中的无功分量进行补偿。

该方法由于LPF的采用,使得检测系统的动态响应性能较差。LPF主要是影响 $i_{id}$ 、 $i_{iq}$ 中的直流分量,当负载电流突然变化时, $\bar{i}_{id}$ 和 $\bar{i}_{iq}$ 也会相应发生变化,并且一段时间之后才能过渡到另一个稳态值。

下面以二阶巴特沃斯低通滤波器为例,分析检测环节的性能,滤波器的传递函数为

$$G(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中, $\xi = 0.707$ ;  $\omega_0$ 为滤波器的截止频率。

此时,图2中检测系统的传递函数为

$$G_k(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_0 s}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2)$$

以 $\omega_0 = 20$  Hz为例,具体分析检测性能。此时检测系统传递函数的零极点如图3所示,传递函数有两个共轭极点 $p_1 = -89 + j89$ 和 $p_2 = -89 - j89$ ,两个零点 $z_1 = 0$ 和 $z_2 = -178$ ,其中 $z_1$ 位于原点, $z_2$ 距离原点较远。

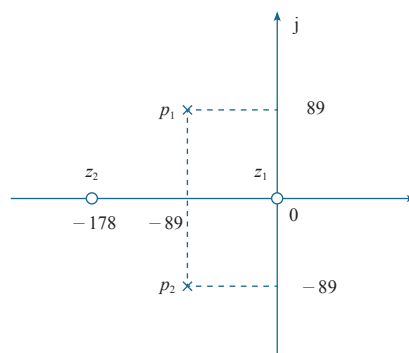


图3 谐波检测系统零极点

零点的不合理分布会直接影响到检测系统的动态性能。考虑到对系统传递函数进行调整,加入一个校正环节,使系统零点均分布在原点周围,从而可以使检测系统的动态性能有所提高。

根据这一思想,基于瞬时功率谐波检测法,提出了一种串联超前校正的谐波检测法。检测原理如图4所示。

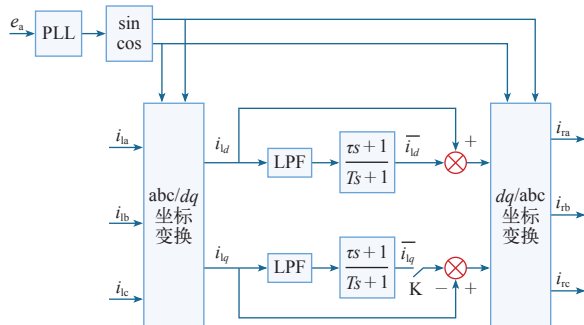


图4 串联超前校正的谐波检测法

加入的校正环节为

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{Ts + 1} \quad (3)$$

为了实现合理调整检测系统零点的目的,  $G_c(s)$ 中参数  $T$  与  $\tau$  的选择应满足  $T \ll \tau$ , 并且  $\tau$  的取值可以根据需要调整的零点来选择。选取  $\tau = \frac{1}{\xi\omega_0}$ ,  $T = 0.01\tau$ 。

以  $\omega_0 = 20 \text{ Hz}$  为例, 设计加入的校正环节为

$$G_c(s) = \frac{0.011s + 1}{0.00011s + 1} \quad (4)$$

该校正环节的零点为  $z = -89$ , 极点为  $p = -8880$ 。通过调整后, 得到检测系统新的传递函数为

$$G_k(s) = \frac{s(s + 1.776)(s + 9055)}{(s + 8880)(s^2 + 177.6s + 1.577 \times 10^4)} \quad (5)$$

新的零极点分布图如图5所示。

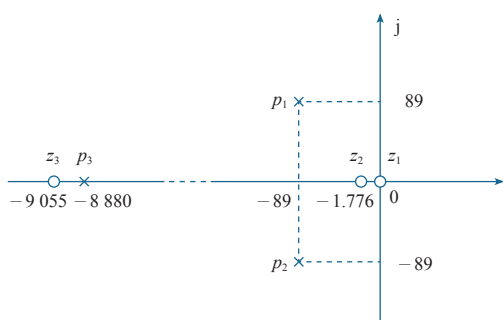


图5 调整后检测系统零极点

经过调整后的检测系统增加了一对对偶零极点, 它们对检测系统的影响很小, 可不作考虑。

而主导极点没有发生改变, 因此对检测系统的传递函数的调整对其频率响应特性影响很小。而经过调整后, 原本远离原点的零点  $z_2$  从  $-89$  移到  $-1.776$ , 与原点的距离大大减小, 从而使得检测系统的零点分布相对合理, 检测系统动态响应性有所改善。

## 2. 电流跟踪控制策略

在参考电流给定后, 使输出电流实现无静差跟踪也是很重要的环节。通过上文检测环节得到的参考信号为交流周期信号, 而常规PI调节器只有在控制量为直流量时才能够实现无静差。一种方法是先通过相应的坐标变换将参考电流转化成直流量, 再在对应的坐标系下对直流量采用常规PI控制<sup>[8]</sup>。但由于上文中得到的参考电流含有大量谐波, 即为多个不同频率正弦信号的组合, 因此针对包含的每一频率, 都要进行一次相应的旋转坐标变换, 将其转化成直流信号, 再用常规PI控制对这些直流信号分别进行控制, 最后经过反变换后重新叠加, 如图6所示。

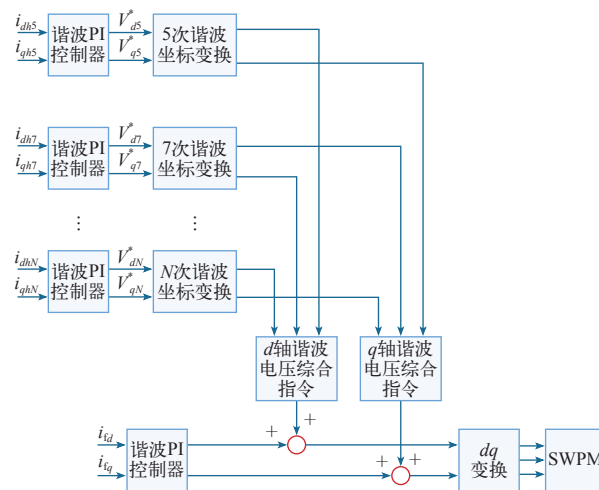


图6 PI分频控制框图

因而这种方法尽管能够实现无静差与分频控制, 但是由于坐标变换多, 在实际应用时比较复杂。针对此问题, 提出采用广义积分控制器<sup>[9]</sup>, 在  $abc$  坐标系下对交流参考值实现无静差跟踪, 如图7所示。

常规积分器形式为  $G(s) = 1/s$ , 针对直流信号进行幅值积分。不同于常规积分器, 其是一种针

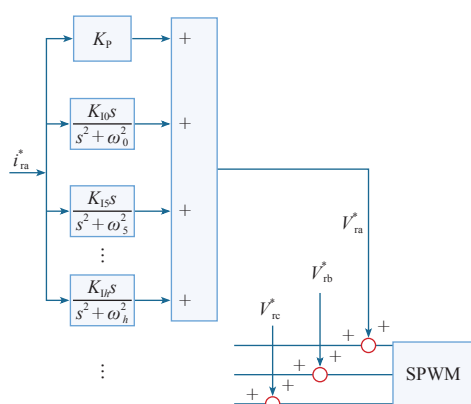


图7 广义积分控制方案

对非直流信号的积分器，传递函数为

$$G(s) = \frac{2s}{s^2 + \omega^2} \quad (6)$$

式中， $\omega$  为积分器谐振频率，采用这种控制方式可以实现交流周期信号的零稳态误差。为了对电网电流中主要次谐波进行无差跟踪，采用的abc坐标系下的广义积分器传递函数为，即

$$G_c(s) = K_p + \frac{2K_{10}s}{s^2 + \omega_0^2} + \sum_{h=6k \pm 1} \frac{2K_{1h}s}{s^2 + \omega_h^2} \quad (7)$$

式中， $K_p$  为比例增益； $K_{1h}$  为积分增益； $\omega_0$ 、 $\omega_h$  分别为基波与  $h$  次谐波的角频率， $\omega_h = h\omega_0$ 。

传统广义积分器有良好的频率选择性，并且在角频率  $\omega_h$  处的增益无穷大，但其频率鲁棒性比较差，在电网运行频率偏离额定值时，广义积分器参数  $\omega_h$  和对应次谐波实际频率之差  $\Delta\omega$  会相应增大，使得控制器增益在对应次谐波处发生较大衰减<sup>[10]</sup>。为了减小上述问题的影响，通过对式（6）进行修正，得到新的传递函数为

$$G(s) = \frac{2K_1\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_h^2} \quad (8)$$

式中， $\omega_c$  为截止频率。设电网工作频率相对于额定值偏移了  $\pm 0.5$  Hz 时，满足

$$|G(\omega_h \pm \pi h)| = 0.707 K_1 \quad (9)$$

求得  $\omega_c$  的表达式为

$$\omega_c = \frac{\pi h}{2} \left( \frac{\pi + 2\omega_0}{\pi + \omega_0} \right) \quad (10)$$

修正后的广义积分器减弱了电网工作频率偏离额定值造成的影响，可是也会带来一些问题，

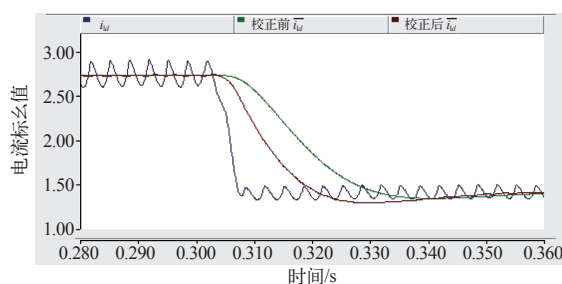
频率选择性变差，当输入中在  $\omega_h$  附近存在噪声时，则会对噪声起到放大作用。

## 仿真验证

通过PSCAD/EMTDC对所提控制策略进行了仿真验证。仿真主电路见图1，配电系统线电压基准值为380 V，额定频率为50 Hz。为了验证该控制方法在谐波抑制及三相不对称补偿方面的实时性与准确性，负载模型中加入了谐波电流源与三相不平衡负载。

### 1. 算例1

为了验证加入校正环节后对谐波检测系统动态响应性能的影响，在 0.3 s 时刻，将非线性负载突然减小。图8为谐波检测环节  $i_{1d}$  与  $\bar{i}_{1d}$  在加入校正环节前后的变化曲线。

图8  $i_{1d}$ 与校正前后  $\bar{i}_{1d}$  波形

从图8中可以看出，检测系统调整后  $\bar{i}_{1d}$  的响应速度得到很大提升，基波电流调节时间从25 ms减少到15 ms，从而谐波检测环节的响应速度也得到了提升。 $\bar{i}_{1d}$  在下降后有微小波动才趋于稳态，且式（3）中  $\tau$  值越大， $\bar{i}_{1d}$  的响应速度越快且波动越明显。可以通过试验调整  $\tau$  值，使  $\bar{i}_{1d}$  的响应速度与波动量都相对合理。 $\tau = 0.011$  时，在15 ms后，检测误差可达到5%以内，且最终稳态误差小于1%。

### 2. 算例2

为了验证广义积分器对交流参考值的跟踪效果，以及改进后对频率波动的适应性。当系统频率  $f_s = 50$  Hz 时，广义积分控制器有良好的跟踪效果。若系统实际频率  $f_s = 49.5$  Hz，改进前后的参考电流和跟踪电流如图9所示。

图9中可以看出，改进后跟踪电流与参考电流波形之间静差明显减小，检测误差由改进前的20%

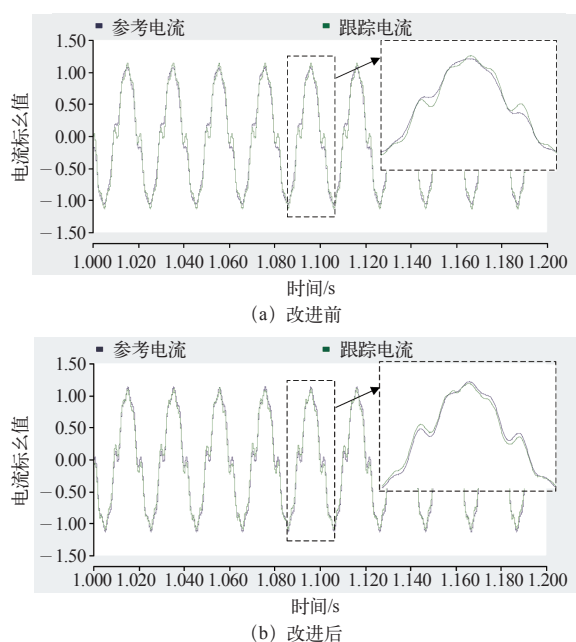


图9 参考电流和跟踪电流

降低到3%。可见电网频率在允许范围内发生波动时,改进后的广义积分控制器仍然有良好的跟踪控制效果,对频率波动有很好的适应性。

### 3. 算例3

为了验证光伏并网逆变器进行电能质量控制的效果。在0.5 s时刻,将非线性负载突然减小。图10、图11分别为光伏并网逆变器对广义谐波电流进行补偿前后,A点的三相电流与电压。

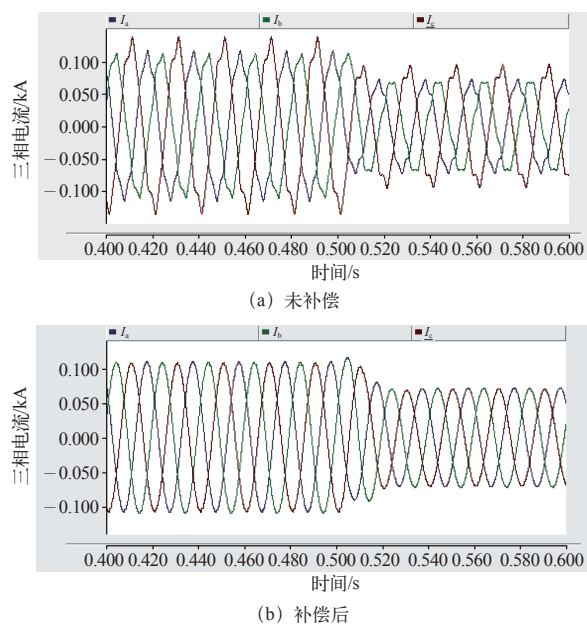


图10 A点的三相电流波形

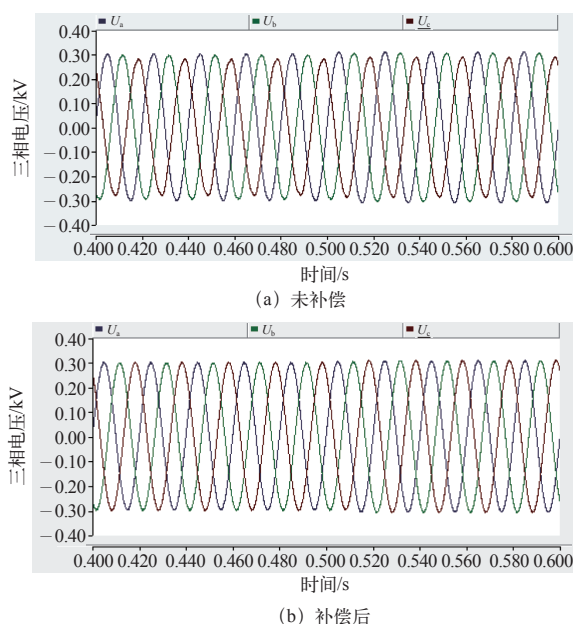


图11 A点的三相电压波形

从图10、图11中可以看出,光伏并网逆变器能快速补偿负载谐波分量,对负载突变有良好的适应性。补偿前后,A点电能质量指标,即三相电流总谐波畸变率(THD)和三相电压不平衡度如下表所示。

表 A点电能质量情况

| 时间     | A点电能质量情况 | 未补偿(%) | 补偿后(%) |
|--------|----------|--------|--------|
| 0.5 s前 | A相电流THD  | 9.00   | 1.00   |
|        | B相电流THD  | 8.47   | 1.05   |
|        | C相电流THD  | 9.60   | 0.97   |
|        | 三相电压不平衡度 | 3.40   | 0.67   |
| 0.5 s后 | A相电流THD  | 12.59  | 1.02   |
|        | B相电流THD  | 12.60  | 1.12   |
|        | C相电流THD  | 11.60  | 0.96   |
|        | 三相电压不平衡度 | 3.30   | 0.65   |

从表中可以看出,利用并网逆变器进行电能质量控制,A点三相电流THD明显降低,从而有效抑制了谐波电流渗入大电网;并且经过逆变器补偿后,A点电流THD在0.5 s负载变化前后没有明显变化;同时经过补偿后,A点电压不平衡情况也得到很大的改善。

可见所提控制策略能够快速响应负荷波动,并将谐波畸变率、电压不平衡度控制在允许范围内,具有较好的实时性和有效性。

## 结束语

1) 基于瞬时无功功率理论, 提出了一种串联超前校正的谐波检测方法, 通过对检测系统传递函数的零点进行合理调整, 有效改善了其动态响应性能。

2) 传统广义积分控制器频率鲁棒性差, 本文对此进行了改进, 以实现与交流信号的准确跟踪, 对频率波动有良好的适应性。

3) 利用光伏并网逆变器, 有效抑制了谐波以及电压不平衡, 可最大限度地发挥逆变型分布式电源的效能, 节省了微电网建设投资, 对改善微电网的电能质量有很好的实用性。

## 参考文献

- [1] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 100-105.
- [2] 徐青山. 分布式发电与微电网技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [3] 黄俊, 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [4] Marei M I, El-saadany E F, Salama M M A. A novel control algorithm for the DG interface to mitigate power quality problems [J]. IEEE

Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (3): 1384-1392.

- [5] Bert Renders, Koen De Gussemme, Wouter R Ryckaert, et al. Converter-connected distributed generation units with integrated harmonic voltage damping and harmonic current compensation function [J]. Electric Power System Research, 2009, 79 (1): 65-70.
- [6] 周林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (9): 137-145.
- [7] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (14): 82-86.
- [8] 范瑞祥, 罗安, 涂春鸣. 并联混合型有源滤波器的分频控制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (25): 108-113.
- [9] 唐诗颖, 彭力, 康勇, 等. 并联有源滤波器广义积分控制设计新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (12): 40-45.
- [10] 周娟, 张勇, 耿乙文, 等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (6): 113-120.

(收稿日期: 2015-06-21) EA

## 信息动态

### 西门子推出全新技术 提高输电线路可靠性

西门子推出一项开创性的输电技术, 该项技术也成为德国向替代能源转型的一个重要转折点。全桥技术能确保以可靠低损方式远距离输送电能。德国输电系统运营商 Amprion 与 TransnetBW 将在其 ULTRANET 直流输电项目中首次运用该技术。ULTRANET 是德国拟建的 3 条纵贯南北的高压直流 (HVDC) 输电线路中的第一条。这条输电线路两端将分别配备一个输电容量达到 2000 MW 的新一代换流站, 起始端的换流站将电力从交流电转换为直流电, 末端的换流站再将直流电转换为交流电。借助全桥技术,

低损直流输电线路能快速、灵活地修复故障, 不必全网断电。此外, 它还能保障交流电网的稳定性。

新开发的西门子变流器的优势在于提高输电线路的可用性。这一全新技术的另一个创新之处是: 它能在停电后为局部电网再次供电, 从而避免长时间停电。“全桥技术能非常迅速地识别故障, 这样可以防止电网问题演变成大停电事故,” 西门子股份公司能源管理集团首席执行官 Jan Mrosik 表示, “这项创新成果是西门子助力成功扩建电网的必要技术, 也是过渡到替代能源历程中的一个重要部分。”