

DOI: 10.7667/PSPC151496

分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究

康成功¹, 李献伟², 张国军¹

(1. 辽宁工程技术大学, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 考虑到并网逆变器与有源电力滤波器在拓扑结构、使用功能以及控制方法上的相似性, 提出了一种将并网发电与电力有源滤波相结合的统一控制策略。在详细分析统一控制系统结构与工作原理的基础上, 从谐波与无功电流检测、电压与电流控制等方面进行分析设计, 实现了在 dq 旋转坐标系下对系统的统一控制。该控制策略使并网逆变器在并网发电的同时也能进行谐波抑制与无功补偿, 不仅充分发挥了分布式发电的优越性, 而且改善了电网的电能质量。最后通过仿真验证了该控制策略的有效性与可行性。

关键词: 谐波抑制; 无功补偿; 分布式发电; 电能质量

Research on power quality control strategy incorporating distributed generation

KANG Chenggong¹, LI Xianwei², ZHANG Guojun¹

(1. Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Considering the similarity in structures, using functions and control methods of the grid-connected inverter and active power filter, a unified control strategy is proposed. This strategy can realize both grid-connected power generation and active power filtering. Based on the analysis of the architecture and principle of the unified control system, harmonic and reactive current detection, voltage and current control method are designed for the system. Finally, the system can be controlled in the revolving coordinate reference frame. Using this unified control strategy, grid-connected generation, harmonics suppression and reactive power compensation are achieved at the same device, which exerts the advantage of distributed generation and improves grid power quality. At last, simulation results verify the validity and feasibility of the proposed strategy.

Key words: harmonics suppression; reactive power compensation; distributed generation; power quality

0 引言

随着现代工业的不断发展, 电网中接入了大量的非线性和冲击性负荷, 使得电网的电能质量不断下降, 供用电设备的安全性降低, 同时使电能的使用效率不断下降, 在电网和电气设备上产生附加损耗, 造成能源的浪费^[1-2]。与此同时, 分布式电源接入配电网的渗透率越来越高, 这些分布式电源具有随机性和波动性, 引起了更为严重的电能质量问题。传统的诸如无源滤波器之类的电能质量治理装置已经越来越不能满足电能质量的要求了, 这就不得不通过加装新的电能质量治理装置来改善电网的运行, 但是, 这种方案不仅增加了系统成本而且维护难度也相应增加。

分布式电源需要通过并网逆变器接入到配电网中, 然而分布式电源的随机性和波动性使得装置得

不到充分利用^[3-4]。以光伏发电系统为例, 在光照充足的白天, 并网逆变器的利用率能够得到保证; 如果在夜晚或阴雨天光照很弱或无光照的情况下, 往往需要将发电装置切离电网, 这样不仅影响并网逆变器的利用率, 而且频繁的投切也影响电网的稳定运行^[5]。对有源电力滤波器(APF)来说, 虽然能够对电网中的谐波和无功进行补偿, 但其功能单一、成本高的缺点却严重影响其使用推广, 目前主要应用在三相大功率工业领域^[6]。针对并网逆变器与 APF 的不足, 并考虑到两者在结构方面、功能方面、控制方面的相似性, 可以考虑利用并网逆变器在并网发电的同时实现对电网的谐波、无功治理。目前, 国内外学者开展了许多相关问题的研究^[7-10], 给出了各种不同的控制策略, 然而这些控制策略实现起来仍然存在各种不足, 因此, 该领域的研究仍有很大的发展空间。

本文通过在并网逆变器的控制系统中加入谐波与无功检测环节, 实现并网发电和谐波、无功治理的统一控制, 最终达到采用一套系统同时实现并网逆变器与 APF 的功能, 实现一机多用的效果。

1 系统结构与原理

图 1 所示为本文所研究的分布式电源并网系统结构^[11]。在光照充足, 光伏阵列向外输送电能时, 并网逆变器的输出电流包括两部分: 一部分是有功电流分量, 为电网中的负载供电; 另一部分是补偿电流分量, 抵消本地非线性负载产生的谐波与无功电流。其中, 有功电流分量优先为本地负载供电, 多余的电能并入大电网, 供给电网中的其他负载。在光照较弱, 光伏阵列停止工作时, 并网逆变器只输出补偿电流分量来抵消本地非线性负载产生的谐波与无功电流。系统没有因治理谐波与无功而增加设备, 只是加入了谐波与无功检测环节, 最终达到给并网逆变器增加谐波与无功治理功能的目的。

分布式电源以光伏阵列为例, 系统采用最大功率点跟踪方法, 得到并网有功电流指令^[12]。然后通过谐波与无功检测环节, 得到补偿电流指令。最后将这两种电流指令合成进行统一控制, 使逆变器输出相应的电流, 同时实现并网发电与谐波、无功治理。

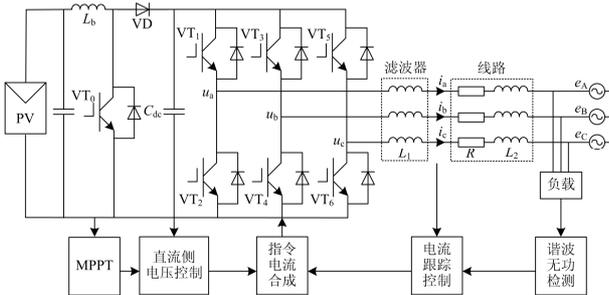


图 1 分布式电源并网系统结构和原理
Fig. 1 Structure and principle diagram of DG grid-connected system

由文献[13]可以看出, 三相并网逆变器在 ABC 坐标系下的模型控制量多、模型复杂; $\alpha\beta$ 坐标系下的模型虽然控制量减少, 但都是交流量, 不利于控制; dq 坐标系下的模型将静止坐标系下的交流量转变为 dq 旋转坐标系下的直流量, 这样就使得控制系统的分析和设计得以简化。因此, 本系统在 dq 旋转坐标系下对并网逆变器进行控制。

根据基尔霍夫电压定律对图 1 所示的电路列电路方程, 滤波电感与线路阻抗上的压降为逆变器输出电压与电网电压之差, 即

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = u_a - e_A \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b = u_b - e_B \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c = u_c - e_C \end{cases} \quad (1)$$

在考虑三相平衡和变换前后功率不变原则的基础上对式(1)进行正交派克变换, 可得三相并网逆变器在 dq 坐标系下的状态方程为

$$\begin{bmatrix} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d - e_d + \omega Li_q \\ u_q - e_q - \omega Li_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $L=L_1+L_2$ 为各相的等效电感; R 为各相的线路电阻; i_d 、 i_q 为 dq 坐标系下的逆变器输出电流; e_d 、 e_q 为 dq 坐标系下的电网侧电压; u_d 、 u_q 为 dq 坐标系下的逆变器输出电压; e_A 、 e_B 、 e_C 为 ABC 坐标系下的电网侧三相电压; u_a 、 u_b 、 u_c 为 ABC 坐标系下逆变器侧输出的三相电压。

在本系统中, 谐波无功检测环节以及电流跟踪环节均需要用到锁相环(PLL)来获取电网电压的实时相位, 以便进行有功、无功量的分离。本系统采用基于电网电压合成矢量定向的闭环数字锁相环技术^[14], 通过对三相电网电压的合成矢量的锁相取代传统的对单相电压的锁相, 在电网电压不对称或畸变的情况下, 依然能够很好地跟踪电网电压。在锁相完成之后有: $e_d = E = \sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}$, $e_q = 0$, 实现了三相电压综合矢量与 dq 坐标系 d 轴的完全同步。

2 谐波和无功电流的检测

传统的 i_d-i_q 法通常采用低通滤波器将 i_d 、 i_q 中的交流量滤除获得直流分量, 然后通过电网电流与直流分量做差来得到需要补偿的谐波和无功电流。然而由于低通滤波器特性的影响, 使系统跟踪时间较长, 动态响应性能不是很好, 这就使得检测环节的速度和精度要受到低通滤波器性能的影响。为了克服这一系列的不足, 用电流平均值模块来取代低通滤波器。

三相负载电流的瞬时值包括基波量和谐波量:

$$\begin{cases} i_{ia} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ i_{ib} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_n) \\ i_{ic} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω 为角频率; I_n 、 φ_n 分别为各次电流的有效值和初相角。

将三相静止坐标系下的瞬时电流转换到两相旋转坐标系下:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \mathbf{C} \mathbf{C}_{32} \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n] \\ -\sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n] \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix}$, $\mathbf{C}_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$ 。

由上式可知, 经坐标变换后, 基波电流分量变成直流量, 而各谐波电流分量的阶次均降低 1 次。考虑到电网电流中多含有 3 次、5 次、7 次等奇次谐波, 因此经坐标变换后这些奇次谐波均变为偶次谐波。虽然正、余弦函数在一个周期内的积分为 0, 但会出现一个周期的延迟; 另外考虑到选各次谐波周期的最小公倍数作为积分区间所得的积分值同样为零。因此我们取积分周期为 $T/2$, 使谐波信号积分值为 0, 最终得到基波电流。原理如图 2 所示。

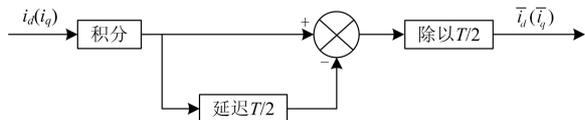


图 2 电流平均值模块原理图

Fig. 2 Current average value block diagram

最终的谐波和无功电流检测原理框图如图 3 所示。K 为无功补偿开关, 当 K 闭合时, 检测结果只有谐波电流; 当 K 断开时, 检测结果既包括谐波电流, 又包括无功电流。

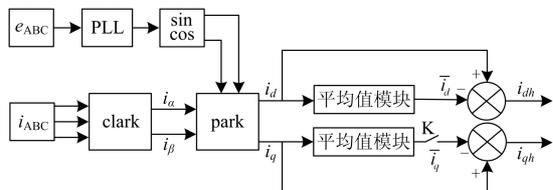


图 3 改进的 i_d-i_q 检测法

Fig. 3 Improved i_d-i_q detection method

3 电压与电流控制

3.1 直流侧电压控制

文献[15]采用的是电压 PI 控制策略来控制直流侧电压的, 考虑到该方法容易使得系统表现出严重的非线性, 而且还具有响应速度慢、超调量和静差大、PI 控制参数选择困难且适应的区域较小等缺点, 本系统采用能量 PI 控制策略[16]来控制直流侧电压, 即将直流侧电容的能量偏差作为电压控制的输入量, 即

$$i'_d = \frac{1}{et} \left(\frac{1}{2} C U_{dc}^{*2} - \frac{1}{2} C U_{dc}^2 \right) \quad (5)$$

式中: C 为直流侧电容值; e 为系统接入点基波电压合成矢量的幅值; t 为直流侧电容的充电时间。控制原理如图 4 所示。

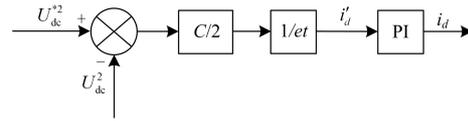


图 4 能量 PI 控制原理图

Fig. 4 Power-PI control diagram

该方法可以根据具体要求来整定 PI 控制器的参数, 从而扩大了 PI 控制对于系统运行状态变化的适应范围。并网电流有功分量 i_d 按式(6)即可获得。

$$i_d = \left(K_{dp} + \frac{K_{di}}{s} \right) i'_d \quad (6)$$

其中, K_{dp} 、 K_{di} 分别为电压环 PI 调节器的比例系数和积分系数。

3.2 电流解耦控制

在锁相完成, 实现三相电压综合矢量与两相旋转坐标系的 d 轴的完全同步之后, $e_d = E$, $e_q = 0$, 因此工作在并网供电模式下的逆变器在 dq 坐标系下的状态方程(2)可化简为

$$\begin{bmatrix} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d - E + \omega Li_q \\ u_q - \omega Li_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

此时, 虽然控制系统的分析和设计得以简化, 但 d 轴与 q 轴分量没有完全分离, 仍存在耦合, 这不仅使得系统的稳定性受到影响, 而且控制系统的设计也比较复杂。因此, 有必要对 d 轴与 q 轴分量进行解耦, 使得 d 轴和 q 轴的电流环 PI 输出不相互影响[17], 即

$$\begin{cases} \Delta u_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = (k'_{dp} + \frac{1}{T'_{di} s})(i_d^* - i_d) \\ \Delta u_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = (k'_{qp} + \frac{1}{T'_{qi} s})(i_q^* - i_q) \end{cases} \quad (8)$$

式中： k'_{dp} 、 k'_{qp} 分别为 d 轴和 q 轴的比例系数； T'_{di} 、 T'_{qi} 分别为 d 轴和 q 轴的积分时间； i_d^* 、 i_q^* 分别为 d 轴和 q 轴电流的给定值； Δu_d 、 Δu_q 分别为 d 轴和 q 轴PI调节器输出。将式(8)代入式(7)得：

$$\begin{cases} \Delta u_d = u_d - E + \omega Li_q \\ \Delta u_q = u_q - \omega Li_d \end{cases} \quad (9)$$

同理可得逆变器工作在APF模式下的解耦控制方程。即

$$\begin{cases} \Delta u_{dh} = L \frac{di_{dh}}{dt} + Ri_{dh} = (k''_{dp} + \frac{1}{T''_{di} s})(i_{dh}^* - i_{dh}) \\ \Delta u_{qh} = L \frac{di_{qh}}{dt} + Ri_{qh} = (k''_{qp} + \frac{1}{T''_{qi} s})(i_{qh}^* - i_{qh}) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta u_{dh} = u_{dh} - E + \omega Li_{qh} \\ \Delta u_{qh} = u_{qh} - \omega Li_{dh} \end{cases} \quad (11)$$

将上述两种模式统一起来便可得到统一解耦控制方程，实现逆变器并网与谐波无功的统一控制。

$$\begin{cases} \Delta u_D = L \frac{di_D}{dt} + Ri_D = (k_{dp} + \frac{1}{T_{di} s})(i_D^* - i_D) \\ \Delta u_Q = L \frac{di_Q}{dt} + Ri_Q = (k_{qp} + \frac{1}{T_{qi} s})(i_Q^* - i_Q) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \Delta u_D = u_D - E + \omega Li_Q \\ \Delta u_Q = u_Q - \omega Li_D \end{cases} \quad (13)$$

式中：实际电流 $i_D = i_d + i_{dh}$ ， $i_Q = i_q + i_{qh}$ ；给定电流 $i_D^* = i_d^* + i_{dh}^*$ ， $i_Q^* = i_q^* + i_{qh}^*$ 。

通过上述过程，可以用统一的控制量进行PI调节以及空间电压矢量调制，使得输出电流能够实时地跟踪给定电流。统一解耦控制策略如图5所示。

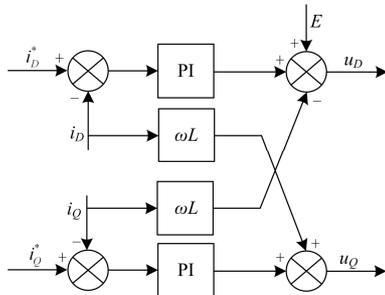


图5 统一解耦控制原理图

Fig. 5 Unified decoupling control diagram

4 系统具体控制策略

本系统在控制过程中需要保证逆变器的输出不超过其额定容量。由前文的分析可知，逆变器的输出包括三部分：并网有功电流、负载无功电流以及谐波电流。因此，需要优先保证光伏电池能够以最大功率输出并网有功电流的条件下，利用剩余的容量进行谐波电流和无功电流的补偿。

图6所示为并网发电与电力有源滤波的统一控制策略。当光照充足，光伏阵列向外输送电能时，逆变器工作在并网发电和电力有源滤波的统一控制模式；当光照很弱或夜晚，光伏阵列不向外输出功率时，逆变器工作在单一的有源滤波模式。结合分布式发电的实际工作情况，使逆变器在以上两种模式下自由切换，便能使逆变器在并网供电和谐波、无功治理方面达到最佳效果。

5 仿真验证

本文利用Matlab/Simulink对所提出的控制策略进行了仿真验证。光伏阵列输出的MPPT跟踪采用恒压法， U_{pv}^* 设置为800V；IGBT触发脉冲通过SVPWM调制策略生成；用带电阻负载的三相全控整流桥，将三相全控整流桥的触发角设定为定值，用来产生谐波电流；用纯电感负载产生无功电流。具体仿真参数设置如表1。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

物理量	数值
电网电压	380 V/50 Hz
光伏电池最大输出功率	20 kW
线路电阻	0.01 Ω
线路电感	0.5 mH
滤波电感	2.5 mH
开关频率	10 kHz
三相对称电阻负载	15 Ω
不可控整流桥电阻负载	15 Ω
电感负载	10 mH

图7所示为系统工作在单独并网发电模式下时A相的网侧电压与网侧电流的仿真波形图，系统接入三相对称电阻负载，环境温度一直为25°C，在0.2s时将光照强度由600 W/m²变为300 W/m²，A相网侧电流畸变率由1.85%变为2.38%，均小于国标5%。可见，无论环境如何变化，二者的相位均能保持一致，逆变器均能实现单位功率因数并网。

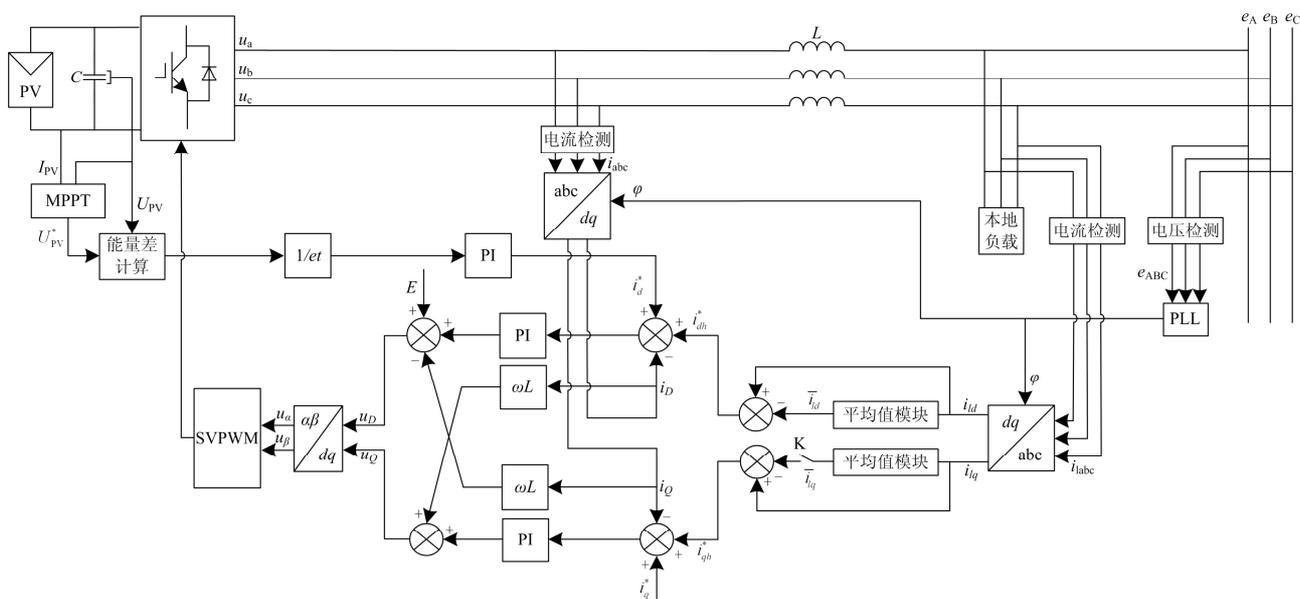


图 6 统一控制策略原理图

Fig. 6 Block diagram of the combined control strategy

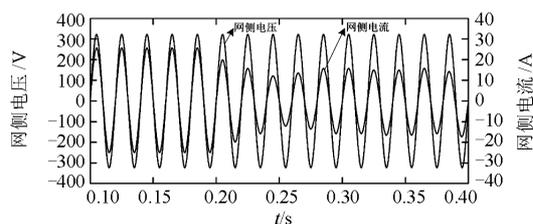


图 7 单独并网发电模式下的 A 相仿真波形图

Fig. 7 Simulation results of A-phase under grid-connected generation mode

图 8 所示为系统工作在单独有源滤波模式下的仿真波形图，无功补偿开关 K 保持闭合，光照强度设为 0，系统接入不可控整流桥电阻负载。在 0.14 s 之前，非线性负载电流畸变严重，使得网侧电流被严重污染，三相的总畸变率分别为 26.68%、26.64%、26.61%。在 0.14 s 时对系统进行谐波补偿，网侧电流波形明显改善，三相的总畸变率分别为 3.54%、3.50%、3.56%，均小于国标 5%。

图 9 所示为系统工作在并网发电与有源滤波统一控制模式下的仿真波形图，无功补偿开关 K 保持闭合，将光照强度设为 600 W/m^2 ，系统接入不可控整流桥电阻负载。在 0.14 s 之前，系统只进行并网发电，网侧电流由于非线性负载的存在被严重污染，三相的总畸变率分别达到 52.50%、49.93%、51.48%。在 0.14 s 时对系统进行并网与滤波的统一控制，三相的总畸变率分别为 5.23%、5.18%、5.21%，非线性负载对网侧电流的影响得到了有效控制。

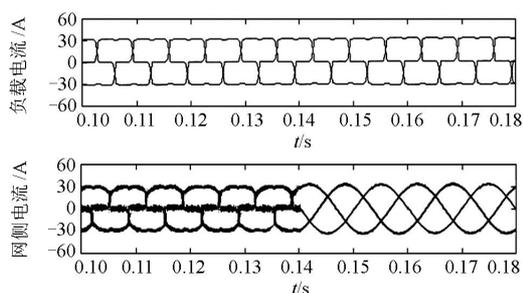


图 8 单独有源滤波模式下的仿真波形图

Fig. 8 Simulation results of active filter mode

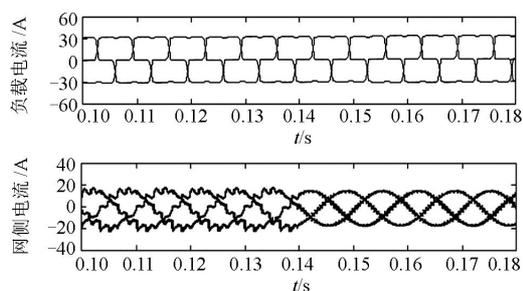


图 9 并网发电与有源滤波统一控制模式下的仿真波形图

Fig. 9 Simulation results of grid-connected generation and active filter unified control mode

图 10 所示为系统工作在并网发电与谐波、无功治理统一控制模式下的仿真波形图，断开无功补偿开关 K，光照强度仍设为 600 W/m^2 ，系统接入不可控整流桥电阻负载和电感负载。在 0.14 s 之前，系统只进行并网发电，网侧电流畸变严重，三相的总畸变率

畸变率分别达到 131.5%、132.3%、131.8%。在 0.14 s 时对系统进行统一控制, 三相的总畸变率分别为 3.05%、3.08%、3.06%, 网侧电流波形明显改善。

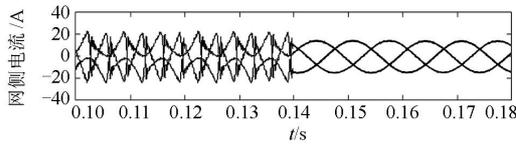


图 10 并网发电与谐波、无功治理统一控制模式下的仿真波形图

Fig. 10 Simulation results of grid-connected generation, active filter and reactive power compensation unified control mode

6 结论

本文根据并网逆变器与 APF 在各方面的相似性, 在不改变拓扑结构的情况下, 通过在并网逆变器控制系统中加入谐波与无功检测环节, 将并网逆变器与 APF 的功能相融合, 使并网逆变器同时实现并网供电和谐波、无功治理, 在兼顾二者功能与优点的同时也提高了装置利用率。整个控制系统的分析和设计是在 dq 旋转坐标系下进行的, 算法简单, 易于实现; 在谐波电流检测环节用平均值模块代替传统的低通滤波器, 使得该环节的检测速度和精度得到提高; 电压环采用能量 PI 控制策略, 简化了对 PI 控制器的设计要求; 最后通过电流解耦控制, 实现有功量与无功量的完全分离, 在保证系统稳定性和动态特性的同时也简化了设计。最后通过仿真验证了控制策略的有效性。

参考文献

[1] XU Xianyong, LUO An, FANG Houhui. Study on novel technologies for electrical energy saving in distribution network and its engineering applications[C] // International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009: 1-7.

[2] 余贻鑫. 科学地建设我国的智能电网[J]. 电器与能效管理技术, 2014(9): 1-9.

YU Yixin. Building China's smart grid scientifically[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(9): 1-9.

[3] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.

FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.

[4] 刘赞甲, 刘伟, 闫涛, 等. 光储联合运行模式下的储能

变流器及控制策略研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(3): 62-66.

LIU Yunjia, LIU Wei, YAN Tao, et al. Study on energy storage equipment and the control strategies of photovoltaic power and energy storage hybrid[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(3): 62-66.

[5] 张晓军. 光伏发电系统协调控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.

ZHANG Xiaojun. Research on coordinated control of photovoltaic system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.

[6] 杜辉. 并网混合型有源滤波器的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.

DU Hui. Research on shunt hybrid active power filter[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.

[7] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 69-74.

YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 69-74.

[8] HAN B, BAE B, KIM H, et al. Combined operation of unified power quality conditioner with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 330-338.

[9] KIM J H, LEE S W, LEE S R, et al. Power quality control using the Goertzel algorithm for grid-connected system[C] // 31st International Telecommunications Energy Conference, 2009: 1-3.

[10] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 107-112.

HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality composite control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 107-112.

[11] 王成山. 微电网分析与仿真实理论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[12] 王晓, 罗安, 邓才波, 等. 基于光伏并网的电能质量控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 68-73.

WANG Xiao, LUO An, DENG Caibo, et al. A power quality control system based on grid-connected photovoltaic power generation[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 68-73.

- [13] 姚金顺. 分布式发电系统并网逆变器控制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
YAO Jinshun. The control strategies for grid-connected inverter in distributed power system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [14] 王力. 分布式电网用有源滤波型并网逆变器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
WANG Li. Research on grid-connected inverter with harmonic compensation for distributed power system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [15] 耿乙文, 伍小杰, 周德佳, 等. 基于改进型比例谐振控制器的三相四线制光伏发电和有源滤波器系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 142-148.
GENG Yiwen, WU Xiaojie, ZHOU Dejie, et al. Research on three phase four wire PV-AF system based on improved proportional resonant controllers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 142-148.
- [16] 曾雨竹, 张仲超, 曾继伦, 等. 改善有源电力滤波器系统动态性能的电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 43-46.
ZENG Yuzhu, ZHANG Zhongchao, ZENG Jilun, et al. Novel voltage control strategy to improve the dynamic performances of active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 43-46.
- [17] 邱燕. 三相并网逆变器滤波及锁相技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
QIU Yan. Research on filtering and phase lock method based on three phase grid-connected inverter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

收稿日期: 2015-08-24; 修回日期: 2015-10-16

作者简介:

康成功(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式能源发电及电力电子技术; E-mail: kcg0618@163.com

李献伟(1982-), 男, 工程师, 主要研究方向为分布式能源接入及微电网稳定控制运行;

张国军(1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 姜新丽)