doi: 10.7690/bgzdh.2026.10.006

用于无功补偿的并联单向可控整流器的控制策略

王　俊[1]，田长庚[2]，王　聪[2]，程　红[2]，李雪艳[1]
（1. 北京工业职业技术学院机电工程学院，北京 100042；
2. 中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院，北京 100091）

摘要：针对单向可控整流器中电流失真固有限制造成的无功补偿能力有限问题，提出一种将无功补偿功能并入单向可控整流器的新解决方案。通过多个单向可控整流器并联，其中一些向电网提供无功功率，而其他用于补偿电流过零失真，可有效地增强单向整流器的无功功率补偿（reactive power compensation，RPC）能力。详细讨论对应于该方案的控制策略，基于有限状态的模型预测控制，有限状态系统建模、设计代价函数、最小化代价函数的过程。仿真结果表明，该解决方案和相应控制方法是可行且有效的。

关键词：单向可控整流器；RPC；谐波电流补偿；并联变换器
中图分类号：TM74　　**文献标志码：**A

Control Strategy of Parallel Unidirectional Controllable Rectifiers for Reactive Power Compensation

Wang Jun[1], Tian Changgeng[2], Wang Cong[2], Cheng Hong[2], Li Xueyan[1]
(1. *School of Mechanical and Electronic Engineering*, *Beijing Polytechnic College*, *Beijing* 100042, *China*;
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *China University of Mining and Technology*, *Beijing* 100091, *China*)

Abstract: To solve the problem of limited reactive power compensation caused by current distortion in unidirectional controlled rectifier, a new solution of incorporating reactive power compensation into unidirectional controlled rectifier is proposed. The reactive power compensation (RPC) capability of the unidirectional rectifier can be effectively enhanced by connecting a plurality of unidirectional controllable rectifiers in parallel, where in some of the unidirectional controllable rectifiers provide reactive power for a power grid, and other unidirectional controllable rectifiers are used for compensating current zero-crossing distortion. The control strategy corresponding to the scheme, the model predictive control based on finite state, the process of modeling the finite state system, designing the cost function and minimizing the cost function are discussed in detail. The simulation results show that the solution and the corresponding control method are feasible and effective.

Keywords: unidirectional controllable rectifier; reactive power compensation (RPC); harmonic current compensation; parallel converter

0　引言

随着电力系统中非线性负荷的使用越来越多，电能质量问题变得越来越严重。在这些问题中，如何准确、有效、经济地求解无功功率和谐波电流问题是近年来的研究热点[1-4]。传统的解决方案包括静止无功补偿器（SVC）、静止无功发生器（SVG）、有源电力滤波器（APF）、统一电能质量调节器（UPQC）和其他电能质量控制设备等。因为其空间和安装要求，导致其高价格和高运营成本，以及远距离输电造成的无功功率和谐波电流损耗问题，传统的解决方案尽管性能优异，但可能不是改善电网电能质量的最佳解决方案。随着分布式发电系统的日益应用，越来越多的文献试图将 RPC 和 HCC 功能集成到现有的单向或双向转换器中[5-17]。新型多功能变频器可以同时实现原有功能和所需的 RPC 和 HCC 功能，这将是一种更经济、更合适的解决方案。同时，工业和商业市场上绝大多数整流器都是单向整流器。与双向整流器相比，现有单向整流器含有较少的全控装置，具有较高的系统稳定性，控制电路相对简单，生产成本较低，体现出明显的应用优势[12-17]。

考虑到这些明显的因素，近年来，越来越多的文献讨论和研究将 RPC 和 HCC 功能纳入单向整流器的可能[14-17]。文献[14-15]，分别讨论了在三相三线制和三相四线制系统中，将 HCC 功能并入传统 VIENNA 整流器的应用，但没有提到在传统

收稿日期：2025-02-10；**修回日期：**2025-03-12
基金项目：国家自然科学基金项目（51577187）；北京工业职业技术学院应用性科研课题（BGZY2019KY-21ZY）
第一作者：王　俊（1981—），男，天津人，博士。

VIENNA 整流器中实现 RPC 功能的方法。文献[16]研究了应用 VIENNA 整流器补偿无功功率和谐波电流的控制算法，但并没有讨论对于 VIENNA 整流器在提供 RPC 功能时造成的输入电流畸变。文献[7]讨论了将 HCC 功能添加到单相二极管整流桥后接 Boost 电路中的可能性，但没有涉及如何通过该电路实现 RPC 功能。文献[12]讨论了在单相二极管整流桥后接 Boost 电路中添加 RPC 功能的可能性。仿真结果表明：当输入电流滞后于电源电压 8°时，输入电流畸变使 THD 高于 5%，因此得出了单向整流器所能提供的最大滞后无功功率的极限条件，但由于没有考虑输入电流畸变的补偿，导致得出的结论不够严谨。文献[17]研究了单向无桥整流器的 3 种工作模式，定量分析了 RPC 模式下输入电流过零畸变，并指出了基于输入电流 THD 的 RPC 能力的限制条件，但也没有讨论如何通过采用适当的控制方法来抑制输入电流畸变。从以上文献可以看出，存在的输入电流过零畸变是限制单向整流器降低电能质量能力的关键因素之一。

由于二极管的固有特性，当单向整流器提供 RPC 功能时，其输入电流会在某一区域周期性地出现过零畸变，并且输入电流不能立即跟踪参考电流[18]。随着输入电流超前或滞后于电源电压的角度增加，失真将变得更加严重；因此，单向整流器无需额外支持即可提供有限的 RPC 功能。一旦超过此限值，畸变可能导致输入电流的 THD 超过相关标准。显然，寻找一种抑制单向整流器输入电流畸变的方法可有效地提高其改善电能质量的能力，但上述文献存在明显不足。

为了解决这个问题，笔者将一定数量的并联单向整流器作为一个整体来提供 RPC 功能，并提出一种基于并联结构的控制策略。由于没有添加额外的硬件结构，使得该方法的成本大大降低。

1　电路拓扑结构

多种负载的电路结构如图 1 所示。

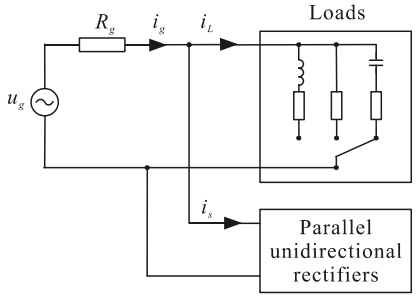


图 1　并联单方向整流器与电网中多种负载的电路结构

假设电网中有感性负载、容性负载和阻性负载 3 种负载。如果存在感性负载或容性负载，电网电流将受到由负载电流 i_L 产生的无功电流分量的严重影响。

多功能并联单向整流器在 PCC 处与不同类型的负载连接，可将有功功率传输至其自身负载，并提供一定量的所需无功电流分量，以同时补偿电网中的不需要的无功电流。根据电网中的不同负载，并联单向整流器可在无功功率补偿模式或功率因数校正模式下运行。并联单向整流器的电路拓扑如图 2 所示。

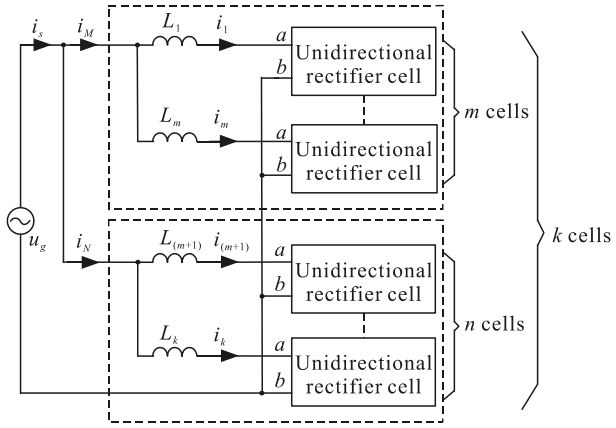
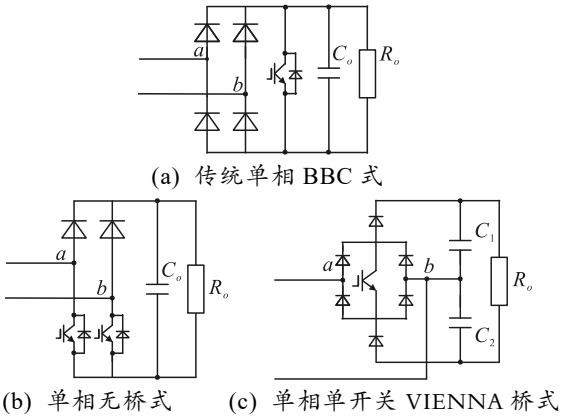


图 2　并联单方向整流器的电路结构

并联结构由数量为 k 的单向整流器组成，其中 k 为正整数，$k\geqslant 2$。单向整流器可以是任何类型，其电路结构如图 3 所示。



(a) 传统单相 BBC 式

(b) 单相无桥式　　(c) 单相单开关 VIENNA 桥式

图 3　并联单方向整流器的单元拓扑类型

当并联单向整流器以无功功率补偿模式运行时，基于电网中无功电流分量的需求，部分并联单向整流器在超前或滞后功率因数下运行，这意味着这些输入电流 i_1, …, i_m 都是超前或滞后电源电压，并且这些整流器可以向电网持续的提供或吸收无功功率。这些整流器的数量为 m，其中 m 为正整数，$m\geqslant 1$ 和 $m<k$。

这些输入电流 i_1, …, i_m 将周期性地出现过零失真，并向 PCC 处增加输入电流 i_s 的 THD。为了抑制这种周期性出现的失真，根据瞬时无功理论，从输入电流 i_s 中提取谐波电流，并将提取出的谐波电流注入到剩余的单向整流器形成参考电流中 $i^*_{m+1},\cdots,i^*_k$。剩余整流器的输入电流将跟踪其参考电流，并包含与 PCC 处输入电流相对应的反向谐波电流。剩余整流器的数量为 n，其中 n=k−m 和 $n\geqslant 1$。

2　控制策略

提出的控制策略包括无功补偿控制策略、谐波电流提取控制策略和谐波电流补偿控制策略 3 部分。

2.1　无功补偿控制策略

如图 4 所示，RPC 控制策略采用传统的双闭环控制方法。外电压环采用恒功率控制方案，内电流环采用同步旋转坐标轴下的电流解耦控制方案。

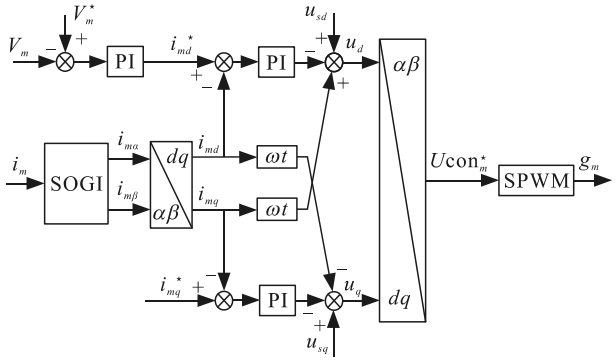


图 4　无功功率补偿控制策略

外部电压环的输出用作内部电流环的有源电流参考 i^*_{md}。通过分配不同的无功电流参考值 i^*_{mq}，输入电流 i_m 可以向电网提供不同的无功率量，电流总和 i_M 可以表示为：

$$\left.\begin{aligned} i_{Md} &= I_{Md}+i_{Md\sim}=\sum(I_{1d}+\cdots+I_{md})+\\ &\quad\sum(i_{1d\sim}+\cdots+i_{md\sim})\\ i_{Mq} &= I_{Mq}+i_{Mq\sim}=\sum(I_{1q}+\cdots+I_{mq})+\\ &\quad\sum(i_{1q\sim}+\cdots+i_{mq\sim}) \end{aligned}\right\}。\tag{1}$$

式中：m 为用于无功补偿的单向整流器的数量；M 为数字 1 到 m 的和；变量 i_{Md} 和 i_{Mq} 分别为 d–q 旋转坐标系下的有功电流和无功电流。

2.2　谐波电流抽取控制策略

由于输入电流，i_1, i_2, …, i_m 周期性地出现畸变，PCC 处输入电流的 THD 将变得更糟。如图 5 所示，根据瞬时无功功率理论检测并提取谐波电流。d–q 旋转框架中的谐波电流方程为：

$$\left.\begin{aligned} \lambda\bullet i_{sd\sim} &= -\frac{p}{n}\bullet(\sum_{n=2}^{\infty}I_{s(2n-1)}\cos[(2n-\\ &\quad 2)\omega t+\phi_{s(2n-1)}])\\ \lambda\bullet i_{sq\sim} &= -\frac{p}{n}\bullet(\sum_{n=2}^{\infty}I_{s(2n-1)}\sin[(2n-\\ &\quad 2)\omega t+\phi_{s(2n-1)}]) \end{aligned}\right\}。\tag{2}$$

在式(2)中，提取的总谐波分量 $i_{S\sim}$ 乘以反平均系数 λ，得到反平均谐波分量($\lambda\bullet i_{S\sim}$)。

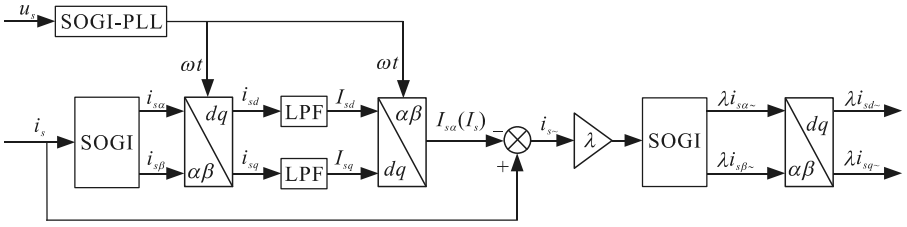


图 5　谐波电流提取控制策略

旋转坐标系中的谐波有功分量($\lambda\bullet i_{Sd\sim}$)和谐波无功分量($\lambda\bullet i_{Sq\sim}$)可以通过 Clark 和 Park 变换对反平均谐波分量($\lambda\bullet i_{S\sim}$)进行变换得到，λ=−(p/n)，p 为谐波补偿增益，n 为剩余整流器的数量。

2.3　谐波电流补偿控制策略

如图 6 所示，HCC 控制策略也采用了传统的双闭环控制方法。描述 d–q 旋转坐标系中系统动力学的状态变量方程为：

$$\left.\begin{aligned} u_d &= u_{sd}-(K_{iP}+K_{iI}/s)(i^*_{nd}-i_{nd})+\omega Li_{nq}\\ u_q &= u_{sq}-(K_{iP}+K_{iI}/s)(i^*_{nq}-i_{nq})-\omega Li_{nd} \end{aligned}\right\};\tag{3}$$

$$\left.\begin{aligned} i^*_{nd} &= I^*_{nd}+\lambda\bullet i_{sd\sim}=I^*_{nd}-\frac{p}{n}\bullet i_{sd\sim}\\ i^*_{nq} &= \lambda\bullet i_{sq\sim}=-\frac{p}{n}\bullet i_{sq\sim} \end{aligned}\right\}。\tag{4}$$

式中：n 为 HCC 的剩余整流器数量；与用于无功功率补偿的整流器的参考电流不同，有功电流参考 i^*_{nd} 为谐波有功分量 $\lambda\bullet i_{Sd\sim}$ 与电压外环输出 I^*_{nd} 的总和；无功电流参考 i^*_{nq} 则为谐波无功分量 $\lambda\bullet i_{Sq\sim}$。

d–q 旋转坐标系中的有功电流和无功电流方程为：

$$\left.\begin{aligned} i_{Nd} &= \sum\left(I_{1d}+\cdots+I_{nd}\right)-p\bullet i_{sd\sim} \\ i_{Nq} &= -p\bullet i_{sq\sim} \end{aligned}\right\}。\tag{5}$$

PCC 处的输入电流为：

$$\left.\begin{aligned} i_{sd} &= \sum(I_{1d}+\cdots+I_{md})+\sum(I_{1d}+\cdots+I_{nd})+ \\ &\quad \frac{1}{1+p}\bullet\sum(i_{1d\sim}+\cdots+i_{md\sim}) \\ i_{sq} &= \sum(I_{1q}+\cdots+I_{mq})+\frac{1}{1+p}\bullet\sum(i_{1q\sim}+\cdots+i_{mq\sim}) \end{aligned}\right\}。\tag{6}$$

式中 $[i_{Nd}\quad i_{Nq}]^{\mathrm{T}}$ 为 HCC 的整流器的输入电流之和，包含与输入电流谐波分量 i_s 相对应的反谐波分量。显然，输入电流 i_s 可以写成 d-q 坐标系中谐波补偿增益 p 的函数，p 值将对 PCC 处输入电流的谐波含量产生影响。理论上，p 值越小，谐波含量越少。

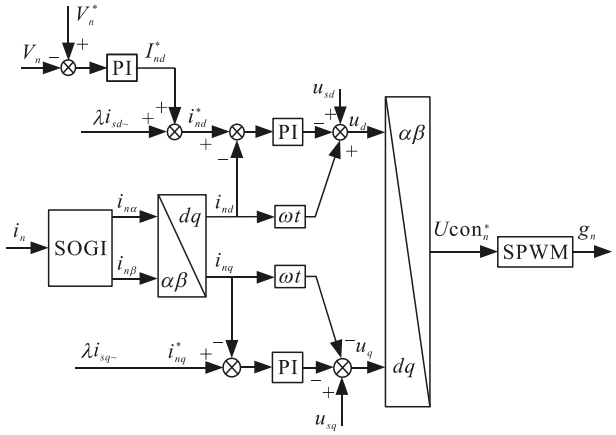


图 6　谐波电流补偿控制策略

3　仿真结果

为了验证所提出的将 RPC 功能集成到单向整流器的解决方案的可行性和有效性，进行了 Matlab/Simulink 仿真。在此仿真中，以并联的 2 个无桥整流器为例。无桥整流器 *A* 用于 RPC 功能，而无桥整流器 *B* 用于 HCC 功能。图 7 显示了仿真电路配置，表 1 和 2 列出了一些重要的仿真参数。

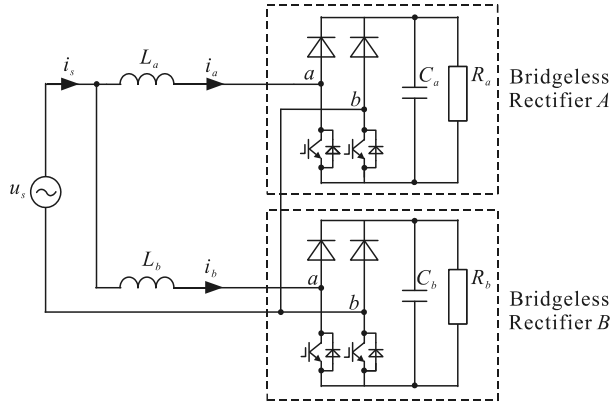


图 7　并联无桥整流器的电路结构

表 1　无桥整流器 *A* 的仿真参数

系统参数	参数值	系统参数	参数值
交流源电压/(Vrms/Hz)	220/50	升压电感/mH	5
总直流母线电压/V	400	直流母线电容/μF	2 200
开关频率/kHz	10	负载电阻/Ω	100

表 2　无桥整流器 *B* 的仿真参数

系统参数	参数值	系统参数	参数值
交流源电压/(Vrms/Hz)	220/50	升压电感/mH	5
总直流母线电压/V	400	直流母线电容/μF	2 200
开关频率/kHz	10	负载电阻/Ω	100

图 8 为在滞后功率因数下运行，仅使用无桥整流器 *A* 时，PCC 处的电源电压和输入电流波形。

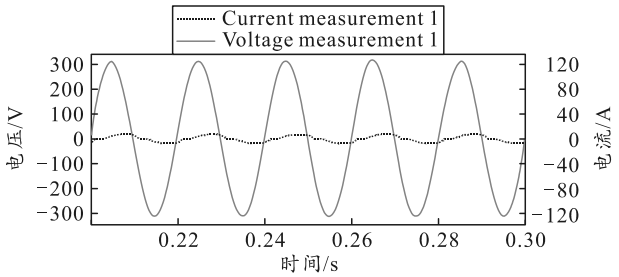


图 8　具有 RPC 功能的单个无桥整流器的输入电流波形

无桥整流器不仅向其自身负载传输有功功率，而且向电网提供滞后功率补偿。可以看到，PCC 处的电流周期性地出现过零畸变。图 9 显示了并联的无桥整流器 *A* 和 *B* 连接时 PCC 处的电源电压和输入电流波形。

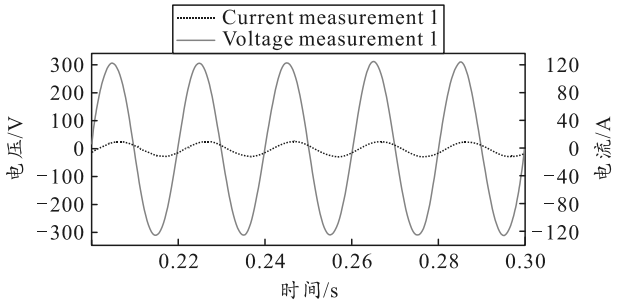


图 9　具有 RPC 功能的并联无桥整流器的输入电流波形

在它们之间，无桥整流器 *A* 仍用于 RPC，而无桥整流器 *b* 用于电流谐波补偿，从图 9 中可以看出，输入电流畸变得到了有效缓解。图 10 为图 8 和 9 中电流波形相对应的 PCC 中电流的谐波谱。

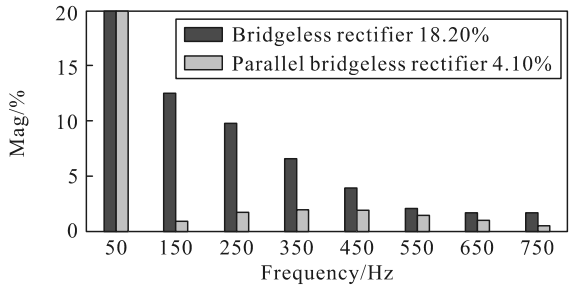


图 10　输入电流 THD 对比

可以看出：图 8 中 PCC 处输入电流的 THD 为 18.2%，而当并联的无桥整流器 *A* 和 *B* 连接时，PCC 处的输入电流 THD 降低到 4.1%，有效地验证了笔者提出的结构和控制方案能够实现 RPC 功能，抑制 PCC 处的谐波电流。在等有功功率输出下，该控制方法可以有效降低输入电流 THD，提高单向整流器的 RPC 能力。

4 结论

笔者提出一种将 RPC 功能并入单向整流器的解决方案，多个单向整流器并联，其中一些需要向电网提供无功功率，而另一个用于补偿电流过零失真。通过这种方式，可以有效地增强单向整流器的 RPC 能力。笔者详细讨论了与该方案相对应的控制策略。仿真结果证明了所提出的解决方案的有效性和所采用的控制策略的正确性。

参考文献：

[1] SINGH M, KHADKIKAR V, CHANDRA A, et al. Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Level with Power-Quality Improvement Features[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 26(1): 307−315.

[2] KISACIKOGLU M C, OZPINECI B, TOLBERT L M. EV/PHEV Bidirectional Charger Assessment for V2G Reactive Power Operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5717−5727.

[3] HU K W, LIAW C M. On a Bidirectional Adapter with G2B Charging and B2X Emergency Discharging Functions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 243−257.

[4] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, BURGOS R, et al. Intergrid: A Future Electronic Energy Network[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(3): 127−138.

[5] MACHMOUM M, COULIBALY P, ABDELLI Y. A power factor controller for three-phase PWM rectifiers and shunt active power filters[C]//International Conference on Harmonics & Quality of Power. IEEE, 2002.

[6] WANG Z, CHEN H. Design of Grid-tied Inverters with the Functions of Reactive and Harmonic Compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 67−71.

[7] HAMZAH N R, HAMZAH M K, HASIM A S A, et al. Single-phase shunt active power filter using single-switch incorporating boost circuit[C]//2008 IEEE International Conference on Power and Energy Johor Bahru. Malaysia: IEEE, 2008: 1112−1117.

[8] BARCENAS E B, CARDENAS V, ROFFIEL J A. Design tradeoffs in PWM rectifiers with active filtering function[C]//2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge. UK: IEEE, 2008: 1234−1239.

[9] ŽÁK J, BLAHNÍK V, PEROUTKA Z. Control strategy of single-phase active rectifier with reactive power compensation[C]//2011 International Conference on Applied Electronics. Pilsen, Czech Rcpublic: university of west Bohemia, 2011: 1−4.

[10] QUANG V M, WEI H, WANG D, et al. A New Type of PWM Rectifier with Function of Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[C]// Control and Decision Conference. Guiyang. China: IEEE, 2013: 4273−4277.

[11] GAN W, JI H, YANG X. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function[C]//2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China: IEEE, 2015: 1−5.

[12] FASUGBAM A, KREINP T. Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers[C]//2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Chicago, IL, USA: IEEE, 2011: 1−6.

[13] PARK S M, PARK S Y. Versatile unidirectional AC-DC converter with harmonic current and reactive power compensation for smart grid applications[C]//2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Fort worth, TX, USA: IEEE, 2014: 2114−2120.

[14] ALAHUHTALA J, VIRTAKOIVU J, VIITANEN T, et al. Space Vector Modulated and Vector Controlled Vienna I Rectifier with Active Filter Function[C]//2007 Power Conversion Conference-Nagoya. Nagcya, Japan: IEEE, 2007: 62−68.

[15] KEDJAR B, AL-HADDAD K. Three-phase four-wire Vienna I rectifier with active filter function including neutral current mitigation[C]//2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Seoul, South Korea: IEEE, 2009: 1510−1515.

[16] KEDJAR B, KANAAN H Y, AL-HADDAD K. Vienna Rectifier With Power Quality Added Function[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3847−3856.

[17] PARK S M, PARK S Y. Versatile Control of Unidirectional AC–DC Boost Converters for Power Quality Mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 4738−4749.

[18] CONG W, YUAN Z, JIAN J, et al. Topologies and Control strategies of Cascaded Bridgeless Multi-Level Rectifiers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 1067−1079.