

DOI: 10.7667/PSPC161546

## 单相分布式发电接入台区电网的谐波补偿控制

翁利国<sup>1</sup>, 朱铁铭<sup>1</sup>, 寿挺<sup>1</sup>, 邱海锋<sup>1</sup>, 李钰双<sup>2</sup>, 周念成<sup>2</sup>

(1. 国网浙江杭州市萧山区供电公司, 浙江 杭州 311201;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 非线性负荷不断增加导致台区电网的谐波问题愈加严峻, 而越来越多分布式发电(DG)接入在实现新能源就地并网的同时, 也为台区电网的谐波治理提供了一个有效途径。以含单相 DG 的台区电网为对象, 考虑三相不对称负荷的接线方式差异, 提出了一种利用单相 DG 的分相谐波补偿控制策略。首先对含单相 DG 的台区电网接线方式和典型台区谐波源负荷情况进行分析, 将不对称负荷等值成星形有中性线、星形无中性线和三角形接线方式, 分别讨论了台区电网的谐波电流分布, 进而推导了单台和两台单相 DG 接入时的谐波电流补偿函数。据此, 采用基于延时环节和同步坐标变换的谐波电流检测方法, 提取各相负荷电流和线路电流的谐波分量, 建立不同接线方式下单相 DG 的谐波补偿控制方案。最后, 利用 Matlab/Simulink 验证了所提的分相谐波补偿控制对台区电网谐波的治理效果。

**关键词:** 台区电网; 单相分布式发电; 接线方式; 谐波补偿

### A harmonic compensation control method for single-phase distributed generations integrated into low voltage power network

WENG Ligu<sup>1</sup>, ZHU Tieming<sup>1</sup>, SHOU Ting<sup>1</sup>, QIU Haifeng<sup>1</sup>, LI Yushuang<sup>2</sup>, ZHOU Niancheng<sup>2</sup>

(1. State Grid Hangzhou Xiaoshan Power Supply Company, Hangzhou 311201, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The increasing number of non-linear loads causes a severe harmonic problem in low voltage power network. The distributed generations (DGs) not only integrate renewable energy sources into utilities, but also provide an effective way for harmonic suppression. Based on the different wiring modes of three-phase asymmetric load, a harmonic compensation control method using single-phase DGs is presented. Firstly, the wiring modes and load conditions of typical harmonic source are analyzed. By equalizing the asymmetric load into star with or without neutral line and delta wiring modes, the distribution of the harmonic current is discussed and the harmonic compensation function is derived. On the basis, the harmonic component of each phase load and circuit is extracted depending on the time delay and synchronous frame transform, and the harmonic compensation control scheme of single-phase DGs is established. Finally, the simulation results verify the effectiveness of the presented method to harmonic suppression by means of Matlab/Simulink.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577018).

**Key words:** low voltage power network; single-phase distributed generation; wiring mode; harmonic compensation

## 0 引言

随着采用开关电源和变频技术的居民和商业用电设备(计算机和荧光灯等电子电器、空调和电冰箱等变频节能家电)的推广和应用, 非线性功率变换装

置接入台区电网的数量和种类不断增加, 将对电网产生不容忽视的谐波影响<sup>[1-2]</sup>。尽管单个居民和商业用电设备的谐波注入远小于电解和电炉等工业整流设备注入的谐波电流, 但是这些小容量的分布式谐波源散布在各个家庭和商业楼宇中, 并且设备用电时段相对集中, 它们注入的谐波聚合后将极大影响台区电网的电能质量<sup>[3-5]</sup>。现场测试表明, 导致台区

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577018)

低压电网出现电压谐波的主因是居民和商业单相用电设备对应的分布式谐波源<sup>[4]</sup>。因此, 须针对单相用电设备接入后引起的谐波问题研究台区电网的谐波分相补偿和抑制方法。

采用电力滤波装置能实现谐波电流的补偿和抑制, 包括无源滤波器、有源滤波器、混合型有源滤波器和感应滤波器<sup>[6-9]</sup>。其中: 无源滤波的结构简单且投资小, 但是滤波效果有限且容易出现谐振问题<sup>[6]</sup>; 有源滤波可弥补无源滤波动态补偿和抑制能力的不足, 但受限于功率器件的容量和成本<sup>[7]</sup>; 混合型有源滤波和感应滤波兼顾了两者的优势, 能满足大容量三相工业整流的谐波治理要求<sup>[8-9]</sup>。现有研究主要针对大型化工和钢铁工厂的谐波治理, 较少涉及商业和居民台区用电的单相谐波补偿。

与此同时, 分布式发电(Distributed Generation, DG)接入台区电网的渗透率不断提高<sup>[10]</sup>, DG 具有开关暂态快和控制方式灵活等优势, 在实现新能源功率变换和调节的同时, 还能向电网提供主动的电能质量治理等功能<sup>[11-14]</sup>。文献[11-12]分析三相和单相光伏发电参与谐波电流补偿的能力, 文献[13-14]研究多个 DG 参与谐波和无功补偿的分摊策略, 可见 DG 的广泛接入为台区电网的谐波治理提供了有效的解决方案。DG 并网逆变器与有源滤波器具有相同的拓扑结构, 它们参与谐波电流补偿均由补偿电流指令值计算和电流跟踪控制两部分组成<sup>[15]</sup>。现有的谐波电流控制包括谐波谐振、重复控制、无差拍和滞环控制<sup>[15-16]</sup>以及线性最优和模型预测等现代控制方法<sup>[17]</sup>, 它们已能较好地实现逆变器的电流快速跟踪和响应。而在谐波补偿电流指令方面, 包括基于瞬时功率、同步坐标变换和滤波技术的时域方法和基于不同形式傅里叶变换的频域方法, 对于 DG 谐波补偿电流还需要考虑逆变器容量的动态约束<sup>[18]</sup>。与常规三相 DG 的谐波补偿不同, 单相 DG 在台区电网的不对称接入, 将使其在谐波补偿时注入不对称的谐波电流。为此须针对单相 DG 接入三相台区电网的谐波传递特性, 研究适当的方法计算单相 DG 的谐波补偿电流指令。

### 1 含单相 DG 台区接线方式及负荷谐波

根据 GB/T 16895 系列标准, 台区 380 V 电网通常采用电源直接接地且外露导电部分通过中性线在电源处接地的 TN 接地方式<sup>[19]</sup>。按照中性线(N)和保护线(PE)的不同接法, 其分为 TN-C、TN-S 和 TN-C-S 3 种, 其中 TN-C 存在设备外壳带电风险, 很少采用, TN-S 可靠性高但耗费材料, 为此主要采用 TN-C-S 的接地方式。小容量的单相 DG 机组直接接

入 380 V 的台区电网, 如图 1 所示, 居民负荷多为单相负荷, 就地的单相 DG 也通过相线和中性线接入台区; 商业负荷有单相和三相负荷, 对容量小于 10 kW 的单相 DG 由相线和中性线(220 V)或两相线(380 V)接入台区, 而大容量的 DG 则经隔离变压器接入三相电网。

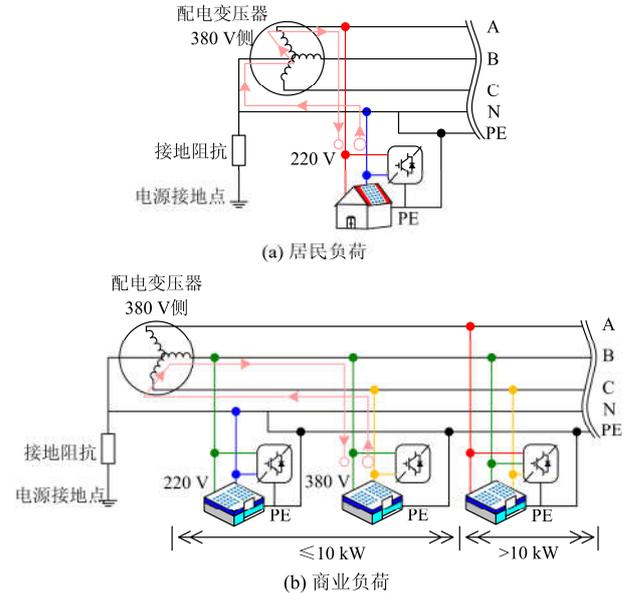


图 1 含单相 DG 的台区电网

Fig. 1 Low voltage network with single-phase DG

台区接单相 DG 后会出现负荷和电源同时不对称的情况, 此时三相不平衡电流将经由中性线流通。图 2 为杭州某配电变压器中性线电流的实测结果, 该台区安装了 3 kW 和 5 kW 分布式光伏发电各一套, 分别经 A、N 线和 B、N 线接入电网。图 2(a) 中不对称负荷导致中性线电流含有小幅的基波分量和以 7 次为主的谐波分量, 这是由于台区负荷三相配置不平衡, 并且主要为采用变频技术的空调和电子电器(见表 1)。当单相 DG 接入后中性线的基波电流明显增加, 其他谐波略有小幅上升; 正常运行时 DG 不会在台区新增谐波污染, 但是单相 DG 接入仍会加重台区的三相不平衡情况。

图 2(b)中分布式光伏发电采用常规的最大功率跟踪控制, 实际由于一次能源的间歇性单相 DG 在正常运行时不会一直处于额定状态, 相应逆变器容量会有一定的裕量, 可有条件地参与台区电网的电流谐波补偿。由图 1 可知, 台区电网的电流谐波流通回路与不对称负荷和电源的接线相关。对由相线和中性线接入的情况, 负荷不对称谐波电流经中性线流通; 由两条相线接入的情况, 尽管谐波电流不流过中性线, 但会改变其接入点上游线路的谐波电流分布。利用单相 DG 进行谐波电流补偿时, 须针

对台区不对称负荷的接线方式差异, 设计逆变器补偿控制策略, 才能达到预期的谐波治理效果。

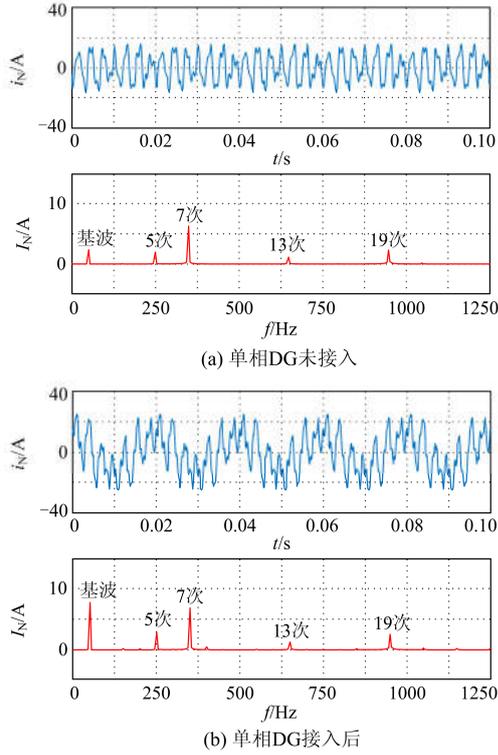


图 2 单相 DG 接入前后的中性线电流  
Fig. 2 Neutral line currents in the network with and without single-phase DG

表 1 杭州典型台区的负荷情况  
Table 1 Load conditions of typical low voltage network in Hangzhou

电力负荷类型		占总用电负荷比例	是否谐波源	
居民	加热电器	电阻加热器 9.1%	×	
		泵式加热器 4.2%	×	
	家用电器 (单相)	家用空调 22.8%	√	
		照明电器	白炽灯 11%	×
			荧光灯 6.7%	√
			LED灯 2.2%	√
		计算机	台式 4.5%	√
			笔记本 2.4%	√
		电视机 5.7%	√	
		电冰箱 4.6%	√	
洗衣机 3.8%	√			
微波炉 2.2%	√			
电磁炉 2%	√			
其他 2.4%	×			
商业	中央空调(三相) 7%	√		
	电动汽车充电桩 9.4%	√		

台区居民和商业负荷的各类用电设备比例(问卷统计)及谐波情况如表 1 所示。除加热电器和白炽

灯外, 其余的负荷均为谐波源负荷, 包括大部分家用电器、三相中央空调和充电桩。以 250 W 台式计算机和 1000 W 微波炉为例, 图 3 为两种负荷的谐波电流实测结果。其中, 计算机由于前端采用不可控整流<sup>[3]</sup>, 其电流谐波含有率高且以 3 次、5 次和 7 次谐波为主; 而微波炉前端为相控整流桥<sup>[5]</sup>, 其谐波含有率有所减少, 但单台设备容量较大, 注入电流谐波分量仍不容忽视。测试结果表明, 表 1 中各谐波源负荷主要含低于 21 次的奇次谐波电流, 它们占台区总用电负荷的 78.1%。在单相 DG 的逆变器中加入辅助控制环节, 使其在并网发电同时, 对台区负荷谐波电流进行补偿, 以治理台区的电能质量污染和提高单相 DG 的设备利用率。

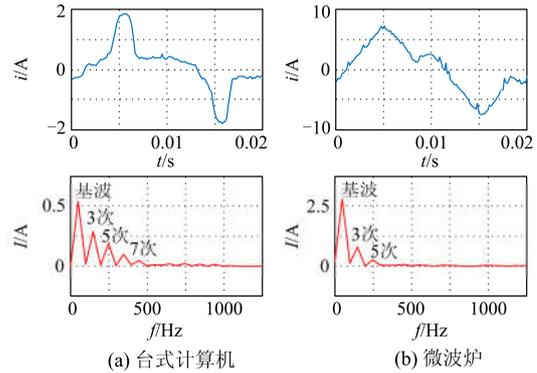


图 3 计算机和微波炉的谐波电流  
Fig. 3 Harmonic currents of personal computer and microwave oven

## 2 台区电网单相 DG 谐波补偿分析

为分析不同接线方式下单相 DG 谐波补偿后台区的谐波情况, 先认为 DG 有足够的逆变器容量参与相邻负荷的谐波补偿。若 DG 容量小于需补偿的谐波视在容量, 须引入可用容量修正系数<sup>[13,20]</sup>, 使 DG 在有限容量下尽可能补偿负荷谐波。针对图 1 中星形和三角形两种接线, 推导台区线路的谐波电流分布, 以得到单相 DG 的各次谐波电流补偿函数。

### 2.1 星形接线的谐波补偿

将各相非线性负荷采用谐波电流源<sup>[2-5]</sup>表示, 可得图 4(a)所示负荷采用星形接线的台区电网等值电路。当 A 相负荷附近接入了具有谐波补偿功能的单相 DG, 可利用该机组吸收 A 相负荷的各次谐波电流, 即图 4(b)中红色虚线表示单相 DG1 注入的谐波补偿电流。则单相 DG 的补偿电流为

$$i_{DGIC} = \sum_{h=3,5,\dots,21} i_{LAh} = \sum_{h=3,5,\dots,21} I_{LAh} \cos(h\omega t + \theta_{LAh}) \quad (1)$$

式中:  $i_{LAh}$  为 A 相负荷的第  $h$  次谐波电流;  $I_{LAh}$  和  $\theta_{LAh}$  为第  $h$  次谐波电流的幅值和相角,  $h=3, 5, \dots, 21$

为奇次电流谐波次数； $\omega$ 为基波角频率。此时，A相的谐波电流可由 DG1 补偿，而 B 相和 C 相的谐波电流将经由中性线形成回路。为此，配电变压器中性线的第  $h$  次谐波电流为

$$i_{N_h} = I_{LB_h} \cos(h\omega t + \theta_{LB_h}) + I_{LC_h} \cos(h\omega t + \theta_{LC_h}) = I_{N_h} \cos(h\omega t + \theta_{N_h})$$

$$\begin{cases} I_{N_h} = \sqrt{(I_{LB_h} \cos \theta_{LB_h} + I_{LC_h} \cos \theta_{LC_h})^2 + (I_{LB_h} \sin \theta_{LB_h} + I_{LC_h} \sin \theta_{LC_h})^2} \\ \theta_{N_h} = \arctan \frac{I_{LB_h} \sin \theta_{LB_h} + I_{LC_h} \sin \theta_{LC_h}}{I_{LB_h} \cos \theta_{LB_h} + I_{LC_h} \cos \theta_{LC_h}} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $I_{LBC_h}$  和  $\theta_{LBC_h}$  为合并 B、C 相后第  $h$  次谐波电流的幅值和相角。当负荷采用星形接线，而中性点不与配电变压器中性点相连时，如果单相 DG 仍按式(1)进行谐波电流补偿，由于其他两相的谐波电流无法经中性线流通，它们必然要流向 A 相线路，如图 4(c)所示。对接入 A 相的 DG 此时仍无法补偿 B、C 相的谐波电流，但为了抵消 A 相的谐波电流，须将其补偿电流指令改进为

$$i'_{DG1C} = \alpha_{DG1} \cdot \sum_{h=3,5,\dots,21} i_{LA_h} + i_{N_h} = \frac{\min(S_{H1}, S_{C1})}{S_{H1}} \cdot \sum_{h=3,5,\dots,21} I_{LA_h} \cos(h\omega t + \theta_{LA_h}) + I_{N_h} \cos(h\omega t + \theta_{N_h}) \quad (3)$$

式中： $\alpha_{DG1}$  为 DG1 可用补偿容量的修正系数； $S_{Ci}$  和  $S_{Hi}$  为第  $i$  台 DG 逆变器( $i=1$  即 DG1)的可用补偿容量和完全补偿容量。不同 DG 可参与谐波补偿的容量不尽相同，这由单相 DG 逆变器容量和当前机组出力决定。设第  $i$  台 DG 的额定容量为  $S_{ni}$ ，有功和无功出力为  $P_i$  和  $Q_i$ ，则可用补偿容量为

$$S_{Ci} = S_{ni} - \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \quad (4)$$

而完全补偿容量  $S_{Hi}$  为第  $i$  台 DG 在补偿容量足够的情况下须承担的谐波电流补偿容量。设单相 DG1 的额定电压为  $U_{n1}$ ，按谐波负荷电流的视在容量定义<sup>[13]</sup>，可得式(3)中 DG1 的完全补偿容量为

$$S_{H1} = U_{n1} \sqrt{\sum_{h=3,5,\dots,21} (I_{LA_h} \cos \theta_{LA_h} + I_{N_h} \cos \theta_{N_h})^2 + (I_{LA_h} \sin \theta_{LA_h} + I_{N_h} \sin \theta_{N_h})^2} \quad (5)$$

由式(3)的可用容量修正系数  $\alpha_{DG1}$  可知，当 DG1 的  $S_{C1} \geq S_{H1}$  时  $\alpha_{DG1} = 1$ ，DG1 逆变器输出的电流能够完全抵消负荷的谐波电流；而当  $S_{C1} < S_{H1}$  时  $\alpha_{DG1} < 1$ ，DG1 由于可用容量有限仅能部分补偿负荷谐波，其按可用容量与完全补偿容量的比例最大程度地对负荷谐波进行补偿。

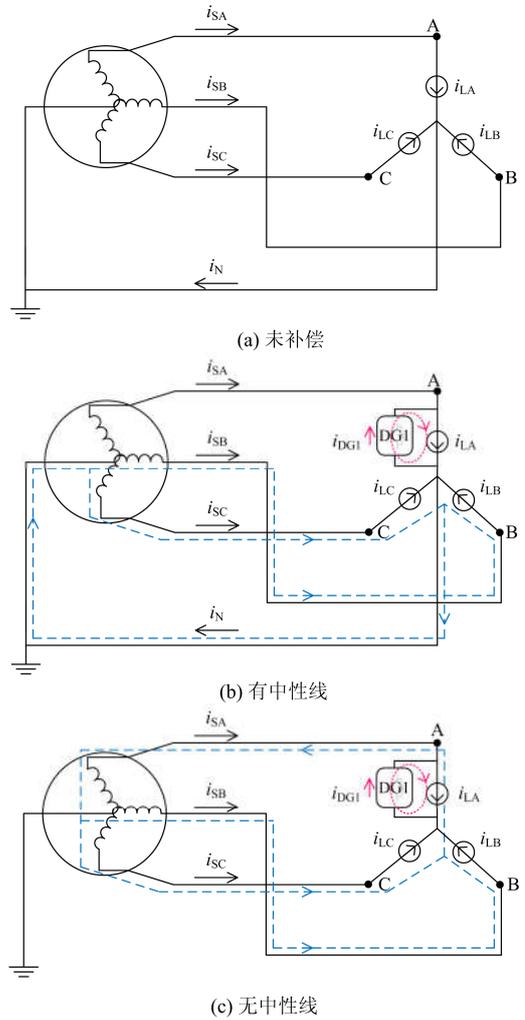


图 4 星形接线下单台 DG 的谐波电流补偿  
Fig. 4 Harmonic current compensation of one single-phase DG under star-type connection

图 5 为两台单相 DG 对 A 相和 B 相电流谐波进行补偿的情况，其中对图 5(a)有中性线的星形接线方式，各相 DG 仅需按式(1)补偿本相负荷的谐波，其余相的谐波电流将流向中性线。而对图 5(b)无中性线的情况，C 相的负荷谐波会通过 A 相和 B 相形成回路，因此 A 相和 B 相 DG 须分摊 C 相负荷的谐波，以消除其他相的谐波干扰。

为了合理利用 A 相和 B 相 DG1 和 DG2 的谐波补偿能力，需要按照各台机组的可用补偿容量比例  $\eta = S_{C1}/(S_{C1}+S_{C2})$ ，分配两相须流通的 C 相负荷谐波电流。同时，对 DG1 和 DG2 还要引入各自的可用容量修正系数  $\alpha_{DG1}$  和  $\alpha_{DG2}$ ，以应对完全补偿容量超过逆变器可用补偿容量的情况。则 A 相和 B 相的 DG1 和 DG2 谐波补偿电流如式(6)。

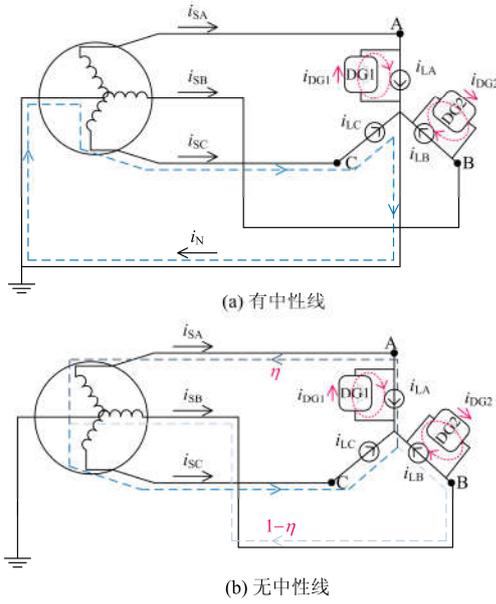


图 5 星形接线下两台 DG 的谐波电流补偿

Fig. 5 Harmonic current compensation of two single-phase DG under star-type connection

$$\begin{aligned}
 i_{DG1C}'' &= \alpha_{DG1} \sum_{h=3,5,\dots,21} i_{LAh} + \eta i_{LC} = \\
 &\alpha_{DG1} \sum_{h=3,5,\dots,21} I_{LAh} \cos(h\omega t + \theta_{LAh}) + \\
 &\quad \eta I_{LC} \cos(h\omega t + \theta_{LC}) \\
 i_{DG2C}'' &= \alpha_{DG2} \sum_{h=3,5,\dots,21} i_{LAh} (1-\eta) i_{LC} = \\
 &\alpha_{DG2} \sum_{h=3,5,\dots,21} I_{LAh} \cos(h\omega t + \theta_{LAh}) + \\
 &\quad (1-\eta) I_{LC} \cos(h\omega t + \theta_{LC})
 \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.2 三角形接线的谐波补偿

对于采用三角形接线的不对称负荷, 图 6(a)给出各相负荷谐波电流的流电路径, 三相谐波电流的零序分量会经变压器中性点流入地, 而正序和零序分量将在三相线路形成流通回路。以 A 相的谐波电流  $i_{ABh}$  为例, 其将经 B 相线路穿过配电变压器的 B 相和 A 相绕组, 再由 A 相线路形成谐波电流回路。由此可得, 台区三相线路谐波电流与三角形回路谐波电流的关系为

$$\begin{bmatrix} i_{SAh} \\ i_{SBh} \\ i_{SCH} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} i_{ABh} \\ i_{BCh} \\ i_{CAh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ABh} \\ i_{BCh} \\ i_{CAh} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $i_{SAh}$ 、 $i_{SBh}$ 、 $i_{SCH}$  和  $i_{ABh}$ 、 $i_{BCh}$ 、 $i_{CAh}$  分别为三相线电流和相电流的第  $h$  次谐波分量;  $\mathbf{A}$  为关联矩阵。对于单台 DG 接入 A 相的情况, 当采用式(1)仅对本相的负荷谐波进行补偿时, 可使 A 相的各次谐波电流  $i_{ABh}=0$ , 但无法消除台区电网全部线路的谐波分量, 甚至可能出现谐波上升的现象。由式(6)可得此

时台区线路的谐波电流为

$$\begin{bmatrix} i_{SAh} \\ i_{SBh} \\ i_{SCH} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} 0 \\ i_{BCh} \\ i_{CAh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{CAh} \cos(h\omega t + \theta_{CAh}) \\ I_{BCh} \cos(h\omega t + \theta_{BCh}) \\ I_{CAh} \cos(h\omega t + \theta_{LCAh}) - I_{BCh} \cos(h\omega t + \theta_{BCh}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $I_{BCh}$ 、 $I_{CAh}$  和  $\theta_{BCh}$ 、 $\theta_{CAh}$  为 B、C 相电流第  $h$  次谐波的幅值和相角。

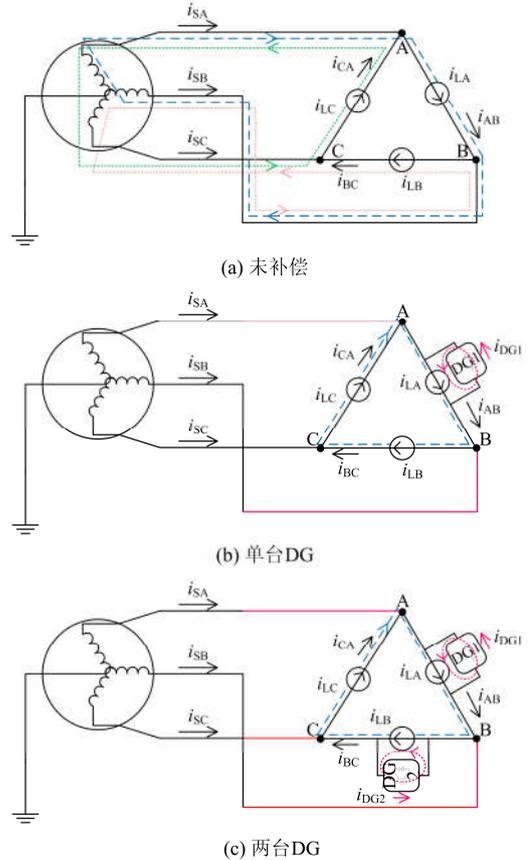


图 6 三角形接线下 DG 的谐波电流补偿

Fig. 6 Harmonic current compensation of single-phase DG under delta-type connection

图 6(b)中 DG1 在注入 A 相负荷谐波电流的同时, 还可注入反向的 B 相(或 C 相)相电流的谐波分量, 以消除 B 相(或 A 相)线路谐波。单台 DG 接入时仅有一个谐波调节自由度, 只能对(除本相外)单相的电流谐波进行吸收。由于 A、B 两相线路的谐波补偿没有优先级, 为此选择注入幅度较小的相电流谐波  $i_{minh}$  即为

$$i_{minh} = \begin{cases} i_{BCh}, & \sum I_{BCh}^2 \leq \sum I_{CAh}^2 \\ i_{CAh}, & \sum I_{BCh}^2 > \sum I_{CAh}^2 \end{cases} \quad (9)$$

利用单台 DG1 吸收 A 相负荷的谐波电流, 以及 B 相(或 A 相)线路的谐波电流, 对应的 DG1 补偿电流为

$$i_{DG1C}^h = \alpha_{DG1} \sum_{h=3,5,\dots,21} i_{LAh} - i_{minh} = \alpha_{DG1} \sum_{h=3,5,\dots,21} I_{LAh} \cos(h\omega t + \theta_{LAh}) - I_{minh} \cos(h\omega t + \theta_{minh}) \quad (10)$$

需注意的是, 式(10)计算 DG1 的可用容量修正系数  $\alpha_{DG1}$  时, 可用补偿容量采用式(4)得到。而完全补偿容量则须按当前情况下, DG1 容量不受约束时需补偿的谐波电流进行计算, 即为

$$S_{H1} = U_{n1} \sqrt{\sum_{h=3,5,\dots,21} (I_{LAh} \cos \theta_{LAh} - I_{minh} \cos \theta_{minh})^2 + (I_{LAh} \sin \theta_{LAh} - I_{minh} \sin \theta_{minh})^2} \quad (11)$$

当式(11)中  $i_{minh} = i_{CAh}$  且  $\alpha_{DG1} = 1$  时, 有  $i_{ABh} = i_{CAh}$ , 由式(7)和式(10)可计算台区线路的谐波电流为

$$\begin{bmatrix} i_{SAh} \\ i_{SBh} \\ i_{SCh} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{ABh} \\ i_{BCh} \\ i_{CAh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{BCh} \cos(h\omega t + \theta_{BCh}) - I_{CAh} \cos(h\omega t + \theta_{CAh}) \\ I_{CAh} \cos(h\omega t + \theta_{CAh}) - I_{BCh} \cos(h\omega t + \theta_{BCh}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

此时, A 相线路的谐波电流被完全抵消, 若负荷电流谐波  $i_{LBh} = i_{LCh}$ , 三相负荷的谐波电流将在三角形内形成环流, 如图 6(b)蓝色虚线, 负荷谐波被完全补偿。若两者不相等, 则仅  $i_{LCh}$  在三角形内循环流通, 并且仍有负荷谐波电流差  $i_{LBh} - i_{LCh}$  继续注入台区电网。

两台单相 DG 与三角形负荷的 A 相和 B 相并联运行时, 如图 6(c)所示。该情况下存在两个谐波调节的自由度, 可在台区三相线路中选择幅度较小的两相谐波电流  $i_{min1h}$  和  $i_{min2h}$  进行补偿, 则 DG1 和 DG2

的谐波补偿电流为

$$i_{DG1C}^h = \alpha_{DG1} \sum_{h=3,5,\dots,21} I_{LAh} \cos(h\omega t + \theta_{LAh}) - I_{min1h} \cos(h\omega t + \theta_{min1h})$$

$$i_{DG2C}^h = \alpha_{DG2} \sum_{h=3,5,\dots,21} I_{LBh} \cos(h\omega t + \theta_{LBh}) - I_{min2h} \cos(h\omega t + \theta_{min2h}) \quad (13)$$

式中,  $i_{min1h}$  和  $i_{min2h}$  为 DG1 和 DG2 的补偿电流分量, 它们由与各相谐波电流幅度和网络拓扑关系决定, 具体选取方式见表 2。需注意的是, 在三角形接线中, 当两条线路的谐波电流被抵消后, 负荷侧的三个相电流相等(形成环流), 可实现三相线路电流谐波的完全补偿, 且不受负荷情况影响。

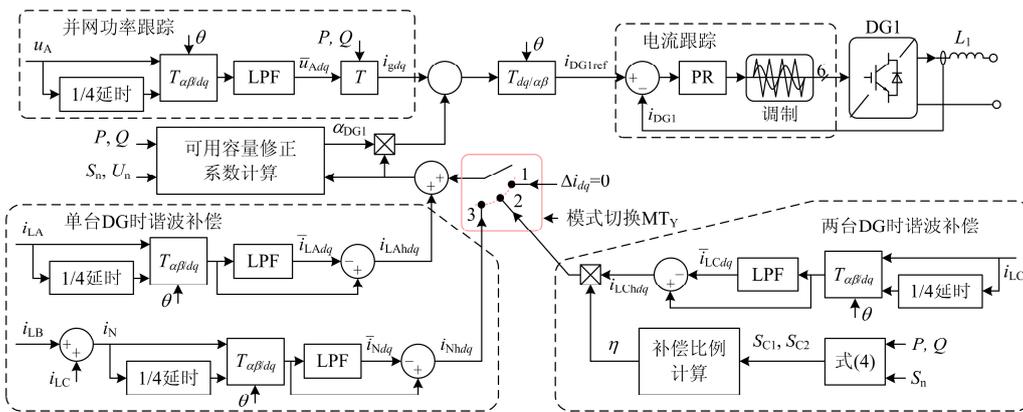
表 2 三角形接线下两台 DG 的补偿电流分配

Table 2 Distribution of compensated currents for two single-phase DG under delta-type connection

条件	$\sum I_{ABh}^2, \sum I_{BCh}^2$ $\leq \sum I_{CAh}^2$	$\sum I_{BCh}^2, \sum I_{CAh}^2$ $\leq \sum I_{ABh}^2$	$\sum I_{ABh}^2, \sum I_{CAh}^2$ $\leq \sum I_{BCh}^2$
DG1	$i_{min1h}$	$i_{ABh}$	$i_{BCh}$
DG2	$i_{min2h}$	$i_{BCh}$	$i_{CAh}$

### 3 台区电网单相 DG 谐波补偿控制方案

对接入台区 A 相线路的 DG1, 其在不同接线方式的控制框图如图 7 所示。常规的单相 DG 谐波补偿只需检测本相负荷的谐波电流, 本文方法为执行更加灵活和精细化的台区电网谐波补偿, 需同时检测本相负荷以及其他两相的谐波电流。每一相的 DG 检测本相负荷电流和电压、其余两相负荷相电流以及自身的并网电流。采用基于同步坐标变换的谐波电流检测方法, 由于仅有单相信号, 须由 1/4 延时环节生成与之正交的辅助信号, 经 Park 变换  $T_{\alpha\beta/dq}$  得到同步坐标下的  $dq$  分量, 结合低通滤波器 (LPF) 取得信号的基波分量, 其中 Park 变换的同步相角  $\theta$  由相电压经锁相环得到。



(a) 星形接线

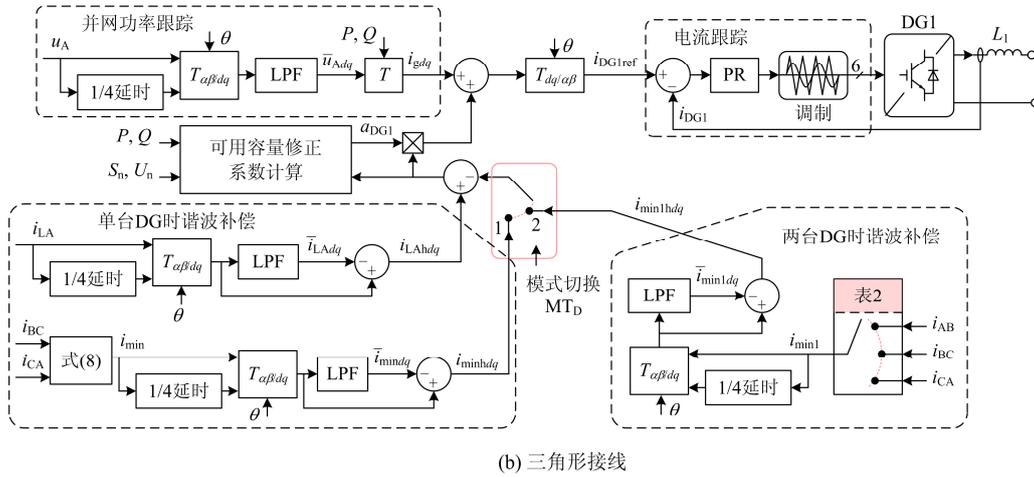


图 7 不同接线方式下 A 相 DG 的谐波电流补偿方案

Fig. 7 Compensation scheme of harmonic current for A-phase DG under different wiring modes

将本地负荷电流和其余两相电流的谐波分量提取后, 按台区接线方式和是否有中性线确定补偿模式, 再用对应的谐波补偿函数计算 DG 的谐波电流补偿指令。该补偿指令为 DG 容量充足时的完全补偿电流, 还须与可用容量修正系数相乘, 对 DG 参与补偿的容量进行条件性约束。图 7(a)的模式切换信号  $MT_D=1, 2, 3$  对应星形接线中单(两)台 DG 有中性线、两台 DG 无中性线和单台 DG 无中性线的补偿模式; 图 7(b)的  $MT_D=1, 2$  对应三角形接线中单台和两台 DG 的补偿模式。在生成谐波指令的同时, 通过并网功率跟踪环节获取 DG 并网的基波电流指令, 两者相加经反 Park 变换  $T_{dq/\alpha\beta}$  后, 取  $\alpha$  轴信号为 DG 输出电流指令。再利用多谐振比例谐振(PR)控制和脉宽调制环节, 实现 DG 并网电流的反馈跟踪控制。

#### 4 仿真分析

为验证所提出的单相 DG 接入台区电网的分相谐波补偿控制策略, 在 Matlab/Simulink 中搭建了图 8 所示模型进行仿真验证。将台区三相负荷等值成由电阻负荷(图中未给出)、不可控整流和相控整流组成的综合负荷。

系统参数如表 3 所示, 三相不平衡谐波负荷的总容量为 160 kVA, 其中电阻负荷  $P_{LA}$ 、 $P_{LB}$  和  $P_{LC}$  为 8 kW, 20 kW 和 20 kW, 不可控和相控整流负荷的直流电阻  $R_{dA}$ 、 $R_{dB}$ 、 $R_{dC}$  和  $R_{tA}$ 、 $R_{tB}$ 、 $R_{tC}$  为 1.5  $\Omega$ 、12  $\Omega$ 、6  $\Omega$  和 3  $\Omega$ 、8  $\Omega$ 、6  $\Omega$ 。DG1 和 DG2 逆变器的直流电压为 900 V, 滤波电感为 1 mH 和 0.5 mH, IGBT 的开关频率为 10 kHz。通过改变图 8 台区电网等值电路的 DG 接入情况和接线方式, 对不同的

运行工况进行测试分析。

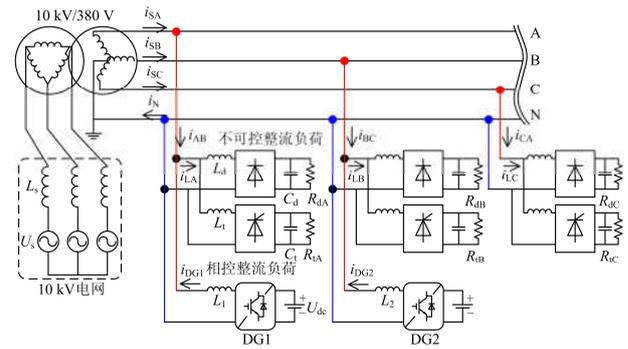


图 8 含单相 DG 台区电网的等值电路

Fig. 8 Equivalent circuit of low voltage network with single-phase DG

表 3 系统参数

Table 3 System parameters

参数	数值	参数	数值		
电网	$U_s$ /kV	10.5	$L_l$ /mH	0.5	
	$L_s$ /mH	25	$C_t$ / $\mu$ F	8000	
	$f$ /Hz	50	$R_{tA}$ / $\Omega$	3	
	$(U_V/U_{t1})$ / (kV/V)	10/380	负	$R_{tB}$ / $\Omega$	8
变压器	$S_{nT}$ /kVA	450	荷	$R_{tC}$ / $\Omega$	6
	$R_T$ /p.u.	0.02		$P_{LA}$ /kW	8
	$X_T$ /p.u.	0.06		$P_{LB}$ /kW	20
负荷	$L_d$ /mH	1.2		$P_{LC}$ /kW	20
	$C_d$ / $\mu$ F	6000		$U_{dc}$ /V	900
	$R_{dA}$ / $\Omega$	1.5	DG	$L_1$ /mH	1
	$R_{dB}$ / $\Omega$	12		$L_2$ /mH	0.5
	$R_{dC}$ / $\Omega$	6		$C_1, C_2$ / $\mu$ F	5500

### 4.1 星形接线仿真结果

两台 DG 逆变器的额定容量均为 40 kW，若图 8 中 DG1 和 DG2 并网有功出力为 8 kW 和 12 kW，无功出力都为 0，台区电网采用星形有中性线接线方式的仿真结果如图 9 所示。图中为两台 DG 未投入补偿和激活补偿功能后的三相电流、中性线电流和 DG 输出电流以及补偿前后的相电流谐波分布。

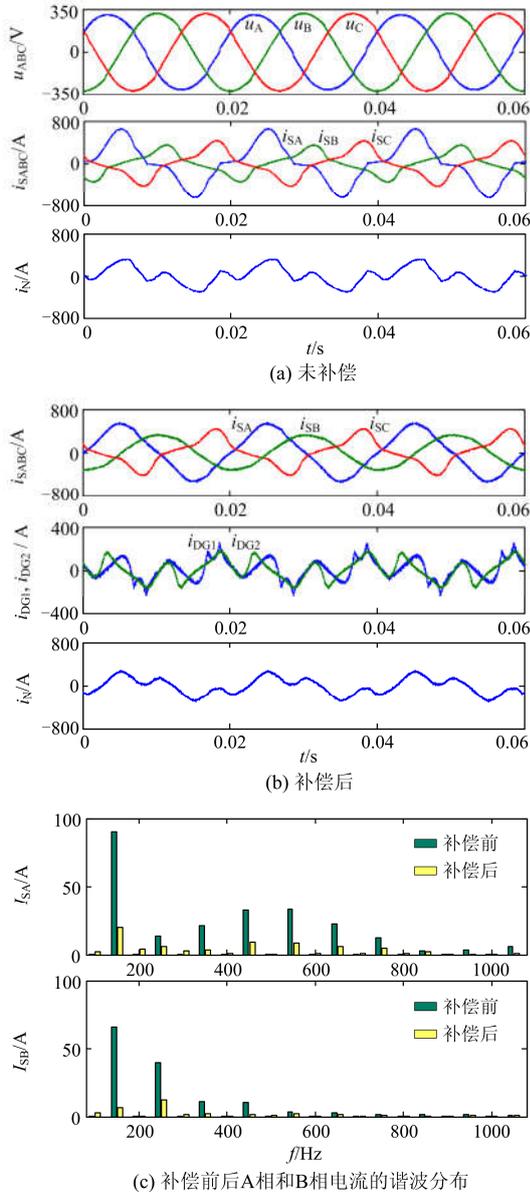


图 9 两台单相 DG 有中性线的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of the case with two single-phase DG and neutral line under star-type connection

图 9(a)中由于台区谐波源负荷三相不对称，使得中性线电流含有明显的谐波分量，这与图 2 的现场测量结果一致。而当 A 相和 B 相的 DG1 和 DG2 激活谐波补偿控制后，C 相的谐波电流仍会经过中

性线形成通路，因而图 9(b)的中性线电流的谐波含量仅出现小幅下降。通过对比补偿前后的三相电流波形可知，DG1 和 DG2 投入后有效吸收了 A 相和 B 相负荷电流的谐波分量，图 9(b)补偿后 A 和 B 两相线路电流基本没有出现谐波失真。

在 DG 未补偿的情况下，B 相线路电流谐波以 3 次和 5 次谐波分量为主，而 A 相电流谐波的分布频带更宽，主要含 3 次、9 次和 11 次谐波分量。DG 投入补偿控制后，A 相和 B 相线路电流的总谐波畸变率由 22.04%和 31.18%，分别下降至 5.37%和 4.6%；同时中性线电流的总谐波畸变率也由 67.05%小幅降低为 59.23%。可见，对于星形有中性线的接线方式，各相 DG 在补偿容量足够即可用容量修正系数等于 1 的情况下，能独立分担(不受其他相负荷谐波影响)本相负荷的谐波电流。如果要完全消除三相负荷的谐波电流，需三相负荷均在本地安装单相 DG，并主动参与台区电网的谐波治理。

对星形无中性线的案例仿真，为便于分析，将系统参数中 A 相和 B 相负荷的直流电阻设为  $R_{dA}=R_{dB}=3\Omega$ ， $R_{tA}=R_{tB}=5\Omega$ ，DG1 和 DG2 的并网有功出力同为 8 kW，其余参数不变。图 10 给出了该案例在常规控制和本文控制策略下的三相线路电流和 DG 输出电流的仿真结果，其中常规控制策略是指两台 DG

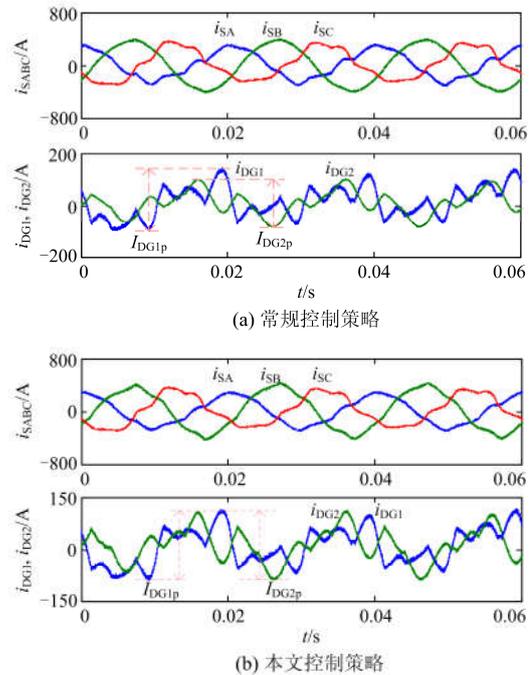


图 10 两台单相 DG 无中性线的仿真结果

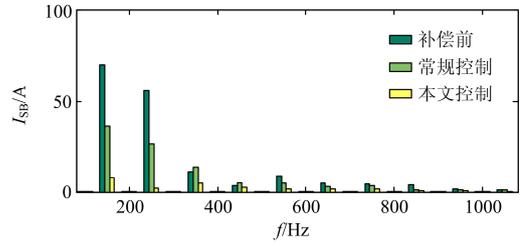
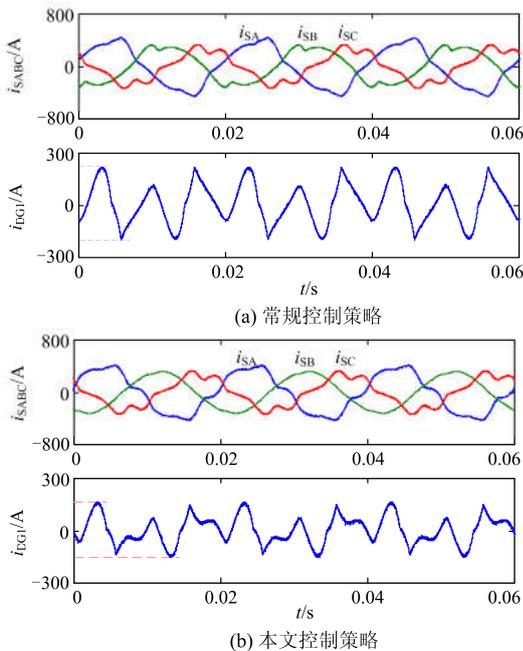
Fig. 10 Simulation results of the case with two single-phase DG and no neutral line under star-type connection

仅按本相的负荷谐波进行补偿。台区电网无中性线提供续流回路, 在常规控制时 A 相和 B 相 DG 补偿本相谐波电流的同时, C 相负荷的电流谐波将依照网络约束自然地由 A 相和 B 相流通, 而它们承担 C 相谐波电流的比例由网络拓扑和参数共同决定。

不同控制策略对应三相线路电流的谐波补偿效果相近, 但 DG1 和 DG2 输出的谐波补偿电流存在差异。图 10(b)中 DG1 和 DG2 输出电流的峰—峰值  $I_{DG1p} \approx I_{DG2p} \approx 205$  A, 而常规控制下  $I_{DG1p} = 235$  A,  $I_{DG2p} = 185$  A。由于 A 相和 B 相负荷的谐波电流基本一致, 并且两台 DG 的可用补偿容量相同, 因此, 合理的谐波补偿分配方案是 DG1 和 DG2 对等地分摊负荷电流谐波。结果对比表明, 常规控制方法让 C 相负荷电流谐波在 A 相和 B 相中自然分布, 无法合理分配两台 DG 的可用补偿容量; 而本文控制主动调节 DG 间的谐波分配, 能够更均衡地处理机组间可用补偿容量的差异。

#### 4.2 三角形接线仿真结果

为使三角形接线案例的综合负荷总容量仍为 160 kVA, 将不可控和相控整流负荷的直流电阻都除以 3, 其余参数与表 3 相同。图 11 为单台 DG 三角形接线案例在采用常规控制和本文控制方法下的仿真波形和不同控制策略下的 B 相线路电流谐波分布。在 DG 未进行补偿时, A 相、B 相和 C 相线电流的总谐波畸变率为 20.79%、30.29%、20.74%, 但其中 B 相的电流谐波幅度最小。当 DG1 采用常规控制只对 A 相负荷的谐波进行补偿后, A 相和 B 相线电流的总谐波畸变率出现了一定程度的减小, 分为 17.04%和 17.20, 而 C 相波形畸变反而加重至



(c) 不同策略下 B 相线电流的谐波分布

图 11 单台单相 DG 的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of the case with one single-phase DG under delta-type connection

24.03%。在图 11(c)中, B 相线电流的 7 次和 9 次谐波相对未补偿时也出现了上升现象。可见, 常规控制并不能很好地实现星形接线下台区线路电流的谐波补偿。采用本文控制策略后, 图 11(b)的 B 相线电流总谐波畸变率下降至 4.58%, A 相和 C 相的线电流波形失真程度与采用常规控制时基本相似。

对比不同控制下 DG1 的输出电流, 可见 DG1 同时补偿 A 相负荷和 B 相线电流谐波时, 两电流的谐波分量具有一定的抵消作用, 使得本文控制下 DG1 输出电流的峰—峰值有所降低。图 12 为 A 相和 B 相都接入 DG 情况下不同控制策略的仿真结果。常规控制下三相线电流的总谐波畸变率为 13.77%, 7.6%和 20.18%, 而本文控制下三相线电流波形均得到改善, 分别为 6.45%, 6.26%和 3.34%。图 12(b)中 DG1 和 DG2 的可用容量修正系数均为 1,

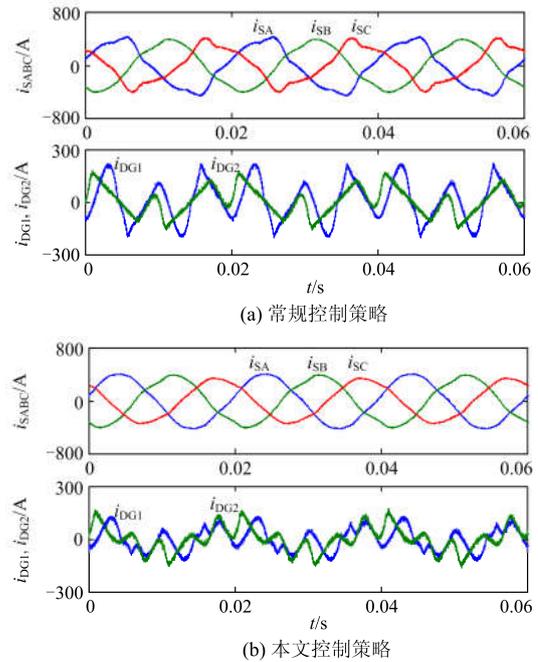


图 12 两台单相 DG 的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of the case with two single-phase DG under delta-type connection

本文方法利用两台单相 DG 实现了三相线电流谐波的完全补偿。

为测试 DG 在不同可用容量下的补偿效果,同时增加 DG1 和 DG2 的有功出力,可得两台 DG 的可用容量修正系数 $\alpha_{DG1}$ 和 $\alpha_{DG2}$ ,如图 13(a)所示。由于 B 相负荷谐波高于 A 相,导致 DG2 本身需承担的谐波电流较大,其在有功出力增加至 16 kW 时可用容量开始出现不足,而 DG1 在有功出力增加至 28 kW 时可用容量修正系数才从 1 开始下降。图 13(b)为三相线电流的总谐波畸变率随可用容量修正系数的变化曲线, $\alpha_{DG1}$ 和 $\alpha_{DG2}$ 为 1 时 DG 能完全补偿负荷谐波,使三相线电流谐波减小至最低值。当两台 DG 可用容量修正系数均值下降至 0.9 时,它们的补偿效果仅能使三相谐波电流总畸变率减小至未补偿时(即可用容量修正系数为 0)的一半左右。由此可见,单相 DG 可用容量修正系数的小幅减小会明显削弱它们的谐波电流补偿效果。

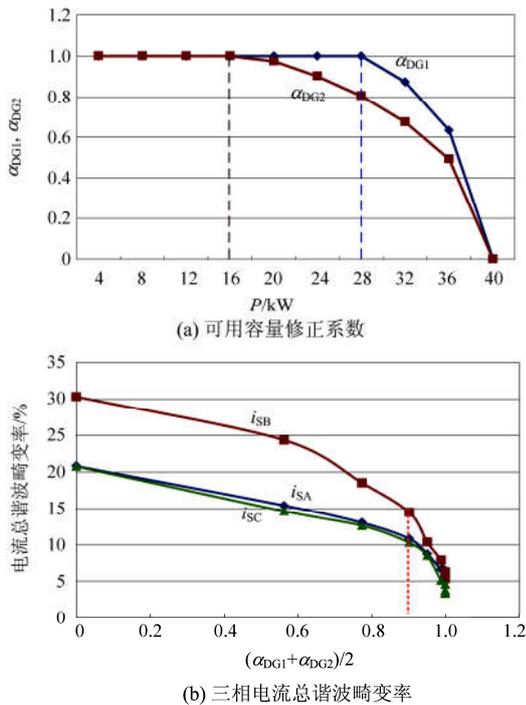


图 13 不同可用补偿容量下的仿真结果

Fig. 13 Simulation results under different available compensation capacities

## 5 结论

根据单相 DG 接入不同接线方式台区电网的谐波传递特性,提出了一种利用单相 DG 的分相谐波控制补偿策略。在 Matlab/Simulink 搭建了含单相 DG 台区电网仿真模型,执行了所提的谐波补偿控制方案,得到如下结论: 1) 对星形有中性线的接线方式,

在各相 DG 补偿容量足够即可用容量修正系数为 1 的情况下,本文控制策略能完全消除台区电网的负荷谐波;对星形无中性线的接线方式,本文的补偿策略能根据可用的补偿容量主动调节 DG 间的谐波分配,均衡不同单相 DG 的谐波补偿电流,以消除其他相的谐波干扰。2) 对于三角形接线方式,本文控制策略可在 DG 补偿容量足够即可用容量修正系数为 1 的情况下,利用两台单相 DG 实现三相线路电流谐波的完全补偿且不受负荷影响;当 DG 可用补偿容量不足时,可用容量修正系数的小幅减小会明显削弱 DG 的谐波补偿效果。针对接线方式差异提出针对性的单相 DG 谐波补偿控制方法,能有效地抑制甚至消除台区谐波电流,改善台区电网的电能质量,提高单相 DG 的设备利用率。

## 参考文献

- [1] 雍静, 王一平. 低压配电系统单相非线性负荷谐波谐波顿模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2692-2698.  
YONG Jing, WANG Yiping. Research on the harmonic Norton model of single-phase nonlinear loads in low voltage distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2692-2698.
- [2] 周念成, 王佳佳, 王强钢, 等. 电动汽车三相不控整流充电机频域谐波模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 156-162.  
ZHOU Niancheng, WANG Jiajia, WANG Qianggang, et al. Frequency domain harmonic model of electric vehicle charger using three phase uncontrolled rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 156-162.
- [3] 朱国锋, 牟龙华. 多馈线型低压配电网分布式谐波治理的优化控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 25-33.  
ZHU Guofeng, MU Longhua. Optimal control of distributed harmonic compensation in low-voltage distribution network with multiple feeders[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 25-33.
- [4] 刘敏, 周晓霞, 陈慧春, 等. 采用三相不可控整流充电机的电动汽车充电站谐波放大效应分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 36-43.  
LIU Min, ZHOU Xiaoxia, CHEN Huichun, et al. Analysis and calculation on harmonic amplification effect of electric vehicle charging station using three-phase uncontrolled rectification charger[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 36-43.
- [5] 雍静, 娄方桥, 王一平, 等. 低压配电系统单相非线性负荷的谐波衰减效应研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 55-62.  
YONG Jing, LOU Fangqiao, WANG Yiping, et al. Investigation on the harmonic attenuation effect of single-phase nonlinear loads in low voltage distribution

- system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 55-62.
- [6] 许津铭, 谢少军, 唐婷. 弱电网下 LCL 滤波并网逆变器自适应电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4031-4039.  
XU Jinming, XIE Shaojun, TANG Ting. An adaptive current control for grid-connected LCL-filtered inverters in weak grid case[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4031-4039.
- [7] 徐千鸣, 罗安, 马伏军, 等. 谐振滤波型模块化多电平换流器低频控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 489-498.  
XU Qianming, LUO An, MA Fujun, et al. The control scheme of modular multilevel converter with tuned filter operating at low frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 489-498.
- [8] 赵辉, 吕新亚, 王红君, 等. 基于复合控制策略的混合有源滤波器谐波治理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 60-66.  
ZHAO Hui, LÜ Xinya, WANG Hongjun, et al. Study on control strategy based on compound control for hybrid active power filter harmonic governance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 60-66.
- [9] 王灿, 罗隆福, 李勇, 等. 新型高效工业整流机组的运行特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 80-86.  
WANG Can, LUO Longfu, LI Yong, et al. Analysis on operating characteristics of a novel efficient industrial rectifier unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 80-86.
- [10] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [11] 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.
- [12] 吴春华, 黄建明, 陈卫民, 等. 单相光伏并网与有源滤波的统一控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 103-109, 117.  
WU Chunhua, HUANG Jianming, CHEN Weimin, et al. Unified control of single phase photovoltaic grid-connected and active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 103-109, 117.
- [13] 曾正, 邵伟华, 赵伟芳, 等. 多功能并网逆变器与并网微电网电能质量的分摊控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4947-4955.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua, ZHAO Weifang, et al. Coordination control of multiple multi-functional grid-tied inverters to share power quality issues for grid-connected micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4947-4955.
- [14] 康成功, 李献伟, 张国军. 分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 99-105.  
KANG Chenggong, LI Xianwei, ZHANG Guojun. Research on power quality control strategy incorporating distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 99-105.
- [15] 许津铭, 谢少军, 肖华锋. LCL 滤波器有源阻尼控制机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 27-33.  
XU Jinming, XIE Shaojun, XIAO Huaifeng. Research on control mechanism of active damping for LCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 27-33.
- [16] 郑建勇, 刘孝辉. Z 源光伏并网逆变器无差拍解耦控制[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 252-256.  
ZHENG Jianyong, LIU Xiaohui. Deadbeat decoupling control of Z-source grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 252-256.
- [17] 江全才, 马骁旭, 李红刚. 新型三相三线制模糊滑模控制并联有源滤波器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 128-133.  
JIANG Quancai, MA Xiaoxu, LI Honggang. Novel fuzzy sliding mode control method for three-phase three-wire shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 128-133.
- [18] MUNIR M S, LI Y W. Residential distribution system harmonic compensation using PV interfacing inverter[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 816-827.
- [19] 卢文华, 姚伟, 罗吉, 等. 微电网接地方式比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 103-109.  
LU Wenhua, YAO Wei, LUO Ji, et al. Comparative study of the earthing systems for micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 103-109.
- [20] LI Zhengming, LI Wenwen, PAN Tianhong. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0018-9

收稿日期: 2016-09-18; 修回日期: 2017-01-14

作者简介:

翁利国(1982—), 男, 工程师, 从事电力新技术和电能质量相关工作;

朱铁铭(1973—), 男, 高级工程师, 从事电网规划和电能质量相关工作。

(编辑 周金梅)