



ارزیابی تحلیلی و ارتقای کیفیت عملکرد فیلترهای اکتیو قدرت تحت شرایط ولتاژ نامتعادل و اعوجاجی بار

احسان پاشا جاوید محمد توکلی بینا مسعود علی اکبر گلکار
دانشکده برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

واژه‌های کلیدی: فیلتر اکتیو قدرت، مولفه‌های ترتیب ولتاژی، هارمونیک، عدم تعادل

چکیده

تئوری عمومی توان راکتیو لحظه‌ای (*GTIP*) تعاریفی پرکاربرد و کارا از توان‌های لحظه‌ای جهت استخراج جریان‌های مرجع جبران‌سازی فیلترهای اکتیو قدرت ارائه نموده است که تحت ولتاژ بار ایده‌آل عملکرد کامل و بی‌نقصی دارند. با این حال، جبران‌سازی با این روش در عمل و در حضور عدم تعادل و یا هارمونیک‌های ولتاژی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مقاله حاضر با مرور تئوری توان لحظه‌ای *FBD* آغاز می‌گردد که بر اساس بهینه‌سازی قابل استحصال است. سپس، با استخراج رابطه موجود بین *FBD* و *GTIP*، از تعاریف *FBD* جهت تحلیل نحوه عملکرد *GTIP* تحت شرایط غیرایده‌آل و آشکار نمودن نقاط ضعف آن استفاده می‌گردد. ثابت می‌گردد که علت ضعف عمده روش *GTIP* تحت شرایط فوق، تاثیر پذیری عملکرد آن از حضور مولفه‌های مختلف ترتیبی در ولتاژ سر بار و همچنین هارمونیک‌های آن می‌باشد. در ادامه، ایده‌های نوینی جهت برطرف نمودن نواقص *GTIP* ارائه می‌گردد تا

بهترین رابطه ممکن جهت استخراج جریان‌های مرجع جبران‌سازی حاصل گردد. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های متعدد جهت تایید مطالب مطرح شده ارائه می‌گردد.

۱- مقدمه

اقبال گسترده اخیر نسبت به استفاده از فیلترهای قدرت بجهت پیشرفت‌های قابل توجه در جهت ساخت سویچ‌های توان بالا با قابلیت فرکانس سویچ‌زنی بالا در کنار افزایش سرعت ریزپردازنده‌ها قابل لمس می‌باشد [۱]. استخراج سیگنال‌های رفرنس جبران‌سازی از مهمترین بخش‌های فیلتر اکتیو می‌باشد که در صورت بروز هر نقصی در آن، عملکرد کل سیستم مختل می‌گردد. تئوری عمومی توان راکتیو لحظه‌ای (*GTIP*) [۲]-[۳] تعاریف جالبی از توان ارائه می‌نماید که ساده و قابل فهم است. این تعاریف جبران‌سازی کاملی را در ولتاژ سر بار ایده‌آل انجام می‌دهد. در حالی که در حضور ولتاژ

¹ General Theory of Instantaneous powers

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

گسترش یافت. در نهایت *Depenbrock* [۶] تعاریف فوق را به مفاهیم لحظه‌ای تبدیل نمود و اجزای مختلف جریان و توان لحظه‌ای را توسط آن تعریف نمود. تعاریف نهائی با عنوان نظریه *FBD* نامگذاری گردید. در این قسمت روش استحصال *FBD* از طریق یک روش بهینه‌سازی تشریح می‌گردد. شکل (۱) را بعنوان یک سیستم نامتعادل و اعوجاجی در نظر بگیرید که در آن $\mathbf{v}(t) = [v_a(t) \ v_b(t) \ v_c(t)]^T$ بردار ولتاژ سر بار و $\mathbf{i}(t) = [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)]^T$ جریان بار می‌باشد. همچنین فرض نمائید جریان را به دو بخش جریانی لحظه‌ای اکتیو و غیراکتیو $\mathbf{i}_q(t) = [i_{qa}(t) \ i_{qb}(t) \ i_{qc}(t)]^T$ که هیچ اشتراکی در انتقال توان اکتیو نداشته باشد تقسیم نمائیم. حال مساله بهینه‌سازی زیر را تعریف می‌نمائیم:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \sum_{k=a,b,c} (i_k(t) - i_{qk}(t))^2 \\ & \text{Subject to: } i_{qa}(t)v_a(t) + i_{qb}(t)v_b(t) + i_{qc}(t)v_c(t) = 0 \end{aligned}$$

از حل این مساله توسط روش معروف لاگرانژ خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{pa}(t) \\ i_{pb}(t) \\ i_{pc}(t) \end{bmatrix} = \frac{i_a(t)v_a(t) + i_b(t)v_b(t) + i_c(t)v_c(t)}{v_a(t)^2 + v_b(t)^2 + v_c(t)^2} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{qa}(t) \\ i_{qb}(t) \\ i_{qc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{pa}(t) \\ i_{pb}(t) \\ i_{pc}(t) \end{bmatrix} \end{cases}$$

حال با جایگذاری $i_a(t)v_a(t) + i_b(t)v_b(t) + i_c(t)v_c(t)$ توسط توان اکتیو بار $p(t)$ داریم:

$$\begin{cases} \mathbf{i}_p(t) = \frac{p(t)}{v_a(t)^2 + v_b(t)^2 + v_c(t)^2} \mathbf{v}(t) = \frac{p(t)}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)} \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{i}_q(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_p(t) \end{cases}$$

تعریف فوق، جریان مرجع جبران‌سازی در *FBD* را نتیجه می‌دهد.

نامتعادل و اعوجاجی عملکرد آن مختل می‌گردد؛ بطوریکه جریان منبع بعد از جبران‌سازی، هارمونیک و نامتعادل بوده و جریان نول غیر صفر را نتیجه می‌دهد [۴]-[۵]. در این مقاله، ابتدا روش توان لحظه‌ای *FBD* [۶]-[۸] مورد بررسی قرار می‌گیرد و چگونگی استحصال آن از عملیات بهینه‌سازی تشریح می‌گردد. علی‌رغم تفاوت ظاهری و عدم-تشابه روش‌های *GTIP* و *FBD* و برخورداری از ساختارهای مختلف، اثبات خواهد شد که روش‌های فوق هم‌ریشه و صورت تغییر یافته‌ای از یک روش و ایده واحد می‌باشند. سپس، نقاط ضعف *GTIP* در حضور عدم تعادل و اعوجاجی بودن ولتاژ از طریق بررسی ساختار *FBD* و نحوه عملکرد آن در این شرایط استخراج می‌گردد. در ادامه، ایده‌های نوینی جهت برطرف نمودن نواقص *GTIP* ارائه می‌گردد تا بهترین رابطه ممکن جهت استخراج جریان‌های مرجع جبران‌سازی حاصل گردد. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های متعدد با نرم‌افزار *MATLAB* جهت تایید مطالب مطرح شده ارائه و تشریح می‌گردد.

۲- چگونگی استخراج تعاریف توان

تعاریف متعددی از توان‌های الکتریکی لحظه‌ای در سیستم‌های سه فاز ارائه گردیده‌اند [۹]. هدف از این تعاریف نحوه جبران‌سازی و تامین توان‌های بار به غیر از متوسط توان اکتیو آن از طریق جبران‌ساز می‌باشد. علی‌رغم برخورداری این تعاریف از ساختارهای نامتشابه، اکثراً هم‌ریشه بوده و عملکرد یکسان دارند. در این بخش بحث فوق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۱. روش استخراج تعاریف *FBD*

اولین بار تعاریف توان‌های الکتریکی در حوزه زمان و در محیط غیرایده‌آل توسط *Fryze* [۱۰] برای سیستم تک‌فاز ارائه گردید. این تعاریف توسط *Buchholz* [۸] برای سیستم سه فاز

¹ Fryze-Buchholz-Depenbrock

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

خواهند داد و تنها در ترکیب ظاهری فرمول‌ها متفاوت به نظر می‌رسند.

۳. بهبود عملکرد $GTIP$ در شرایط غیر ایده‌آل:

با توجه به اثبات یکسان بودن عملکرد FBD و $GTIP$ ، در بخش قبل، ضعف‌ها و مشکلات $GTIP$ در جبران‌سازی تحت شرایط غیرایده‌آل را از طریق تحلیل FBD بدست می‌آوریم. ابتدا لازم است جهت استخراج جریان‌های مرجع جبران‌سازی در (۳) از $\bar{p}(t)$ به جای $p(t)$ استفاده گردد. در این بخش، اثر حضور مولفه‌های ترتیبی و هارمونیک‌های ولتاژ سر بار بر عملکرد جبران‌سازی بررسی می‌گردد تا در هر مرحله ضمن معرفی ضعف بوجود آمده، راه‌حل برون رفت از آن ارائه می‌شود.

۳-۱. بررسی نحوه تاثیرگذاری مولفه صفر ولتاژ

در حضور ولتاژ ایده‌آل سر بار، حذف جریان نول سمت منبع $(i_{sn}(t))$ توسط $GTIP$ بصورت کامل انجام می‌گیرد. با این حال، این عملکرد در صورت وجود مولفه ترتیب صفر در ولتاژ سر بار نقض می‌گردد. به عبارت بهتر، حاصلجمع جریان‌های سه فاز سمت منبع بعد از جبران‌سازی از طریق $GTIP$ در شرایط فوق بصورت زیر است:

$$\mathbf{i}_s^0(t) = \frac{\bar{p}(t)}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)} \mathbf{v}^0(t) \quad (6)$$

که $\mathbf{i}_s^0(t)$ جریان مولفه صفر و $\mathbf{v}^0(t)$ ولتاژ مولفه صفر می‌باشد [۱۱]. جریان فوق منجر به عدم حذف جریان نول سمت منبع $(i_{sn}(t))$ بعد از اعمال جبران‌سازی خواهد شد. پیشنهاد ما جهت حذف $\mathbf{i}_s^0(t)$ از جریان منبع استفاده از $\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^0(t)$ به جای $\mathbf{v}(t)$ در (۳) می‌باشد. در این حالت جریان منبع بعد از جبران‌سازی بصورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{i}_s(t) = \frac{\bar{p}(t)}{(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^0(t)) \cdot (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^0(t))} (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^0(t)) \quad (7)$$

حاصلجمع جریان‌های سه فاز فوق برابر با صفر خواهد شد ($i_{sn}(t) = 3i_s^0(t) = \sum_{k=a,b,c} i_{sk}(t) = 0$). همچنین مقایسه

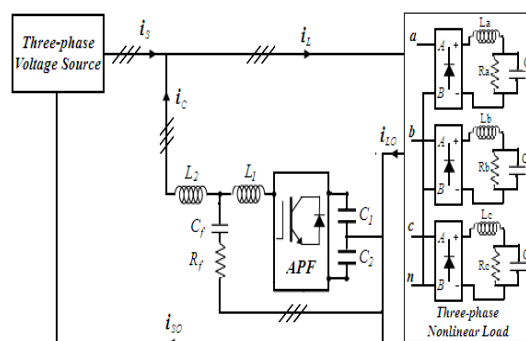
۲-۲. استخراج $GTIP$ از FBD

توان‌ها و جریان‌های اکتیو و راکتیو در $GTIP$ توسط تعاریف زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{cases} p(t) = \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{i}(t) & , \quad \mathbf{q}(t) = \mathbf{v}(t) \times \mathbf{i}(t) \\ \mathbf{i}_p(t) = \frac{p(t)}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)} \mathbf{v}(t), \quad \mathbf{i}_q(t) = \frac{\mathbf{q}(t) \times \mathbf{v}(t)}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)} \end{cases}$$

در صورت بهره‌گیری از تعاریف فوق جهت جبران‌سازی بار در سیستم توزیع سه فاز چهار سیمه مشکلاتی مطرح می‌گردد. از آن جمله می‌توان به اعوجاجی بودن جریان منبع و عدم حذف جریان سیم نول منبع بعد از جبران‌سازی اشاره نمود که این مسائل در بخش شبیه‌سازی بیشتر بحث می‌شود. هدف، استخراج رابطه بین FBD و $GTIP$ می‌باشد. از رابطه (۳) داریم:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_q(t) &= \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_p(t) = \mathbf{i}(t) - \frac{p(t)}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)} \mathbf{v}(t) \\ &= \frac{\mathbf{i}(t)[\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)] - [p(t)]\mathbf{v}(t)}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)} \\ &= \frac{[\mathbf{v}(t) \times \mathbf{i}(t)] \times \mathbf{v}(t)}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)} \end{aligned} \quad (5)$$



شکل ۱. اتصال منبع، بار نامتعادل غیرخطی و جبران‌ساز در یک سیستم سه فاز چهار سیمه

مقایسه (۴) و (۵) تأیید می‌نماید که با تعریف $\mathbf{q}(t) = \mathbf{v}(t) \times \mathbf{i}(t)$ جبران‌سازی یکسانی در مقایسه با FBD خواهد داشت. بدین ترتیب، اثبات می‌گردد که $GTIP$ و FBD در اصل یکسان بوده عملکرد مشابهی را نتیجه

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

تاثیرگذاری $\mathbf{v}^-(t)$ بر عملکرد جبران‌سازی و همچنین جهت حذف $\mathbf{i}_s^-(t)$ از جریان منبع، کاستن $\mathbf{v}^-(t)$ از مقدار کل ولتاژ سر بار $\mathbf{v}(t)$ می‌باشد:

$$\mathbf{i}_c(t) = [(\bar{p}(t) - 3p^o(t)) \frac{(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^-(t))}{(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^-(t)) \cdot (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^-(t))}] + \frac{[(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^-(t)) \times \mathbf{i}(t)] \times (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^-(t))}{(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^-(t)) \cdot (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^-(t))} \quad (11)$$

که $p^o(t) = \mathbf{v}^-(t) \mathbf{i}^o(t)$ توان اکتیو ناشی از ولتاژ مولفه منفی و جریان مولفه صفر است. در واقع جریان مرجع جبران‌سازی فوق از جایگزینی $\mathbf{v}(t)$ با $\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^-(t)$ در فرمول $GTIP$ بدست می‌آید. این شیوه جبران‌سازی را N_GTIP (Negative $GTIP$) می‌نامیم و انتظار داریم با استفاده از آن، جریان منبع مولفه منفی ($\mathbf{i}_s^-(t)$) نداشته باشد.

۳-۳. جبران‌سازی کامل تحت شرایط غیرایده‌آل

با توجه به بحث‌های مطرح شده در بخش‌های (۱-۳) و (۳-۲) مشخص می‌گردد که جهت حذف اثرات منفی حضور مولفه‌های ترتیب منفی و صفر ولتاژ بر عملکرد جبران‌سازی، لازم است این مقادیر از کل ولتاژ در فرمول جبران‌سازی $GTIP$ کسر گردد. در این حالت با حذف مولفه‌های نامطلوب، صرفاً ولتاژ مولفه مثبت $\mathbf{v}^+(t)$ در فرمول باقی خواهد ماند و جریان مولفه مثبت را در جریان منبع نتیجه خواهد داد. فرمول (۱۲) رابطه جریان منبع بعد از جبران‌سازی از طریق روش پیشنهادی را به همراه جریان جبران‌ساز آن نشان می‌دهد:

$$\mathbf{i}_s(t) = \frac{\bar{p}(t)}{\mathbf{v}^+(t) \cdot \mathbf{v}^+(t)} \mathbf{v}^+(t), \quad \mathbf{i}_c(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_s(t) \quad (12)$$

روش فوق را P_GTIP (Positive $GTIP$) می‌نامیم. با استفاده از روش P_GTIP اگر چه اثر مولفه ترتیب منفی $\mathbf{v}^-(t)$ و صفر $\mathbf{v}^o(t)$ بر جبران‌سازی حذف می‌گردد با این حال در صورت وجود هارمونیک‌ها در مولفه مثبت ولتاژ $\mathbf{v}^+(t)$ ، اثر آنها به صورت اعوجاج جریان منبع بعد از جبران‌سازی مشهود می‌گردد. با توجه به این مطلب که ولتاژ ایده‌آل در هر نقطه‌ای از شبکه، ولتاژ هارمونیک پایه مولفه

توان اکتیو منبع ($p_s(t)$) با توان اکتیو بار ($p(t)$) نتیجه زیر را ارائه می‌دهد:

$$p_s(t) = \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{i}_s(t) = \frac{\bar{p}(t)[v_a(t)^2 + v_b(t)^2 + v_c(t)^2 - 3v^o(t)^2]}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t) + \mathbf{v}^o(t) \cdot \mathbf{v}^o(t) - 2\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}^o(t)} = \bar{p}(t) \quad (8)$$

مطلب فوق به این معناست که توان اکتیو تحویلی توسط منبع دقیقاً با مقدار توان اکتیو متوسط بار برابر است و مابقی توان اکتیو مورد نیاز بار (بخش نوسانی) از طریق جبران‌ساز تامین می‌شود. در این حالت جریان جبران‌ساز برابر خواهد بود با:

$$\mathbf{i}_c(t) = [(\bar{p}(t) - 3p^o(t)) \frac{(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^o(t))}{(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^o(t)) \cdot (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^o(t))}] + \frac{[(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^o(t)) \times \mathbf{i}(t)] \times (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^o(t))}{(\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^o(t)) \cdot (\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}^o(t))}$$

که $\bar{p}(t) = \mathbf{v}^o(t) \mathbf{i}^o(t)$ توان اکتیو نوسانی بار و Z_GTIP (Zero $GTIP$) می‌نامیم. روش نوین ارائه شده را Z_GTIP

۳-۲. بررسی نحوه تاثیرگذاری مولفه منفی ولتاژ

همانطور که می‌دانیم بردار ولتاژ $\mathbf{v}(t)$ از سه مولفه ترتیبی تشکیل گردیده است که به ترتیب مولفه مثبت $\mathbf{v}^+(t)$ ، مولفه منفی $\mathbf{v}^-(t)$ و مولفه صفر $\mathbf{v}^o(t)$ می‌باشند ($\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}^+(t) + \mathbf{v}^-(t) + \mathbf{v}^o(t)$). در بخش قبل اثر حضور مولفه صفر ولتاژ بر جبران‌سازی جریان نول منبع از طریق روش $GTIP$ بررسی شد و نحوه بهبود عملکرد آن ارائه گردید. در این بخش اثر حضور مولفه منفی ($\mathbf{v}^-(t)$) بر جریان جبران‌سازی تحلیل می‌گردد. با توجه به فرمول (۳) که بردار جریان منبع بعد از جبران‌سازی با $GTIP$ می‌باشد، در صورت حضور مولفه منفی در ولتاژ سر بار جریان منبع دارای مولفه ترتیب منفی زیر خواهد بود:

$$\mathbf{i}_s^-(t) = \frac{\bar{p}(t)}{\mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{v}(t)} \mathbf{v}^-(t) \quad (10)$$

ظهور مولفه فوق در جریان منبع بعد از جبران‌سازی موجب عدم حذف و یا حتی تشدید اعوجاجات جریانی و عدم تعادل آن می‌گردد. پیشنهاد ما برای درک بهتر شیوه

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

ساختار فیلتر اکتیو جهت جبران‌سازی، شامل یک مبدل AC/DC می‌باشد که از سه بازو جهت نصب کلیدها تشکیل شده است. سیم چهارم به سر وسط بازوی DC بین دو خازن آن وصل می‌گردد. ولتاژ دو خازن مورد استفاده در بازوی DC توسط یک کنترل‌کننده PI تنظیم می‌گردد. جهت راه‌اندازی و فرمان دادن به کلیدها از تکنیک مدولاسیون کنترل جریان هیستریزس با فرکانس متغیر استفاده می‌شود [۱۲]. جهت حذف هارمونیک‌های نامطلوب فرکانس بالا ناشی از کلیدزنی از فیلتری پسیو با ساختار LCL استفاده شده است [۱۳]. جدول (۱) پارامترهای مبدل و فیلتر LCL را در کنار هم نمایش می‌دهد. شبیه‌سازی‌های زیر جهت تحلیل مباحث مطرح شده تنظیم گردیده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای فیلتر اکتیو و فیلتر پسیو LCL

APF side LCL filter inductance L_1	4.1 [mH]
Grid side LCL filter inductance L_2	0.4 [mH]
LCL filter capacitor C_f	10 [μ F]
LCL filter damping resistor R_f	20 [Ω]
APF Switching frequency	6 : 9 [kHz]
APF DC-link capacitors (each one)	2 [mF]
APF DC-link voltage	700 [V]

۴-۱. حالت اول، شبیه‌سازی در حضور ولتاژ ایده‌آل سر بار در این حالت ولتاژ سر بار، سینوسی ایده‌آل با مقدار موثر $200V$ و فرکانس $50Hz$ در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲(a)). با اعمال این ولتاژ بر بار غیرخطی مورد نظر (شکل ۲(b))، جریان نامتعادل اعوجاجی شکل (b) از منبع کشیده می‌شود و موجب جاری شدن جریانی در سیم چهارم منبع (شکل ۲(d)) می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی از لحظه $t=0.04$ تا $t=0.10$ ثانیه نمایش داده می‌شوند تا حالت گذرای اولیه، ناشی از شارژینگ المان‌های شبکه حذف شود. شکل‌های ۲(c) و ۲(e) نمایشگر جریان منبع $(i_s(t))$ و جریان نول منبع $(i_{sn}(t))$ بعد از اعمال روش $GTIP$ می‌باشند. ملاحظه می‌شود که این روش، با تولید جریان جبران‌سازی صحیح در حضور ولتاژ متعادل سر بار، جبران‌سازی کاملی را انجام داده و

مثبت بوده $(v_1^+(t))$ و جریان ایده‌آل آن نیز جریان هم‌فازش می‌باشد، لازم است تنها هارمونیک پایه ولتاژ مولفه مثبت در جریان منبع بعد از جبران‌سازی ظاهر گردد. از این رو جریان مرجع جبران‌سازی زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$\begin{aligned} i_c(t) &= i(t) - \frac{\bar{p}(t)}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} v_1^+(t) \\ &= \frac{(v_1^+(t) \cdot i(t) - \bar{p}(t))}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} v_1^+(t) \\ &\quad + \frac{(v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)) i(t) - (i(t) \cdot v_1^+(t)) v_1^+(t)}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} \\ &= \frac{(p_1^+(t) - \bar{p}(t))}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} v_1^+(t) + \frac{(v_1^+(t) \times i(t)) \times v_1^+(t)}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} \\ &= \frac{(p_1^+(t) - \bar{p}(t))}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} v_1^+(t) + \frac{q_1^+(t) \times v_1^+(t)}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} \end{aligned} \quad (13)$$

که $p_1^+(t)$ توان اکتیو لحظه‌ای ناشی از ولتاژ مولفه مثبت هارمونیک پایه $(v_1^+(t))$ می‌باشد. در این حالت ولتاژ مورد استفاده در جبران‌سازی، صرفاً $v_1^+(t)$ می‌باشد و جریان جبران‌ساز، برابر با $i_c(t) = i(t) - i_1^+(t)$ خواهد بود که بردار جریان مولفه مثبت هارمونیک پایه بار می‌باشد. روش فوق را A_GTIP (*Advanced GTIP*) می‌نامیم.

۴- شبیه‌سازی

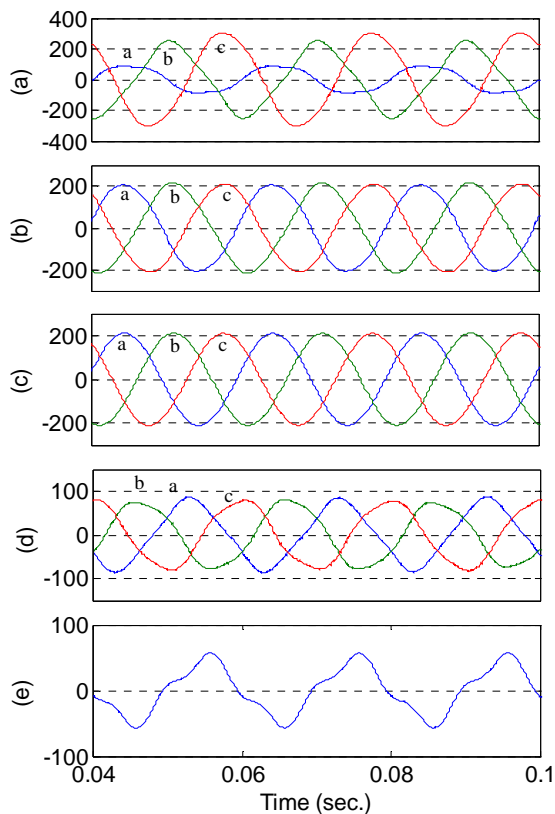
در این قسمت نتایج شبیه‌سازی‌های انجام یافته با $MATLAB$ ارائه گردیده است. جهت بررسی دقیق‌تر مطالب بحث شده، دو حالت کلی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. حالت اول که در آن از ولتاژ سه فاز ایده‌آل با مقدار موثر $200V$ و فرکانس $50Hz$ استفاده شده است و حالت دوم که از ولتاژهای سه فاز نامتعادل و اعوجاجی به عنوان ولتاژ منبع بهره گرفته شده است. بار سه فاز مورد استفاده، سه یکسوساز دیودی تک‌فاز مطابق شکل (۱) می‌باشد که مقادیر المان‌های آنها به فرم (۱۴) می‌باشد:

$$\begin{cases} R_a = 6 \Omega, L_a = 1 \text{mH}, C_a = 0.3 \text{mF} \\ R_b = 4 \Omega, L_b = 1 \text{mH}, C_b = 0.2 \text{mF} \\ R_c = 6 \Omega, L_c = 1 \text{mH}, C_c = 0.2 \text{mF} \end{cases} \quad (14)$$

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\begin{cases} v_a(t) = 70\sqrt{2} \sin(\omega t) + 10\sin(3\omega t - 18^\circ) \\ v_b(t) = 170\sqrt{2} \sin(\omega t - 100^\circ) + 20\sin(3\omega t - 90^\circ) \\ v_c(t) = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + 130^\circ) + 10\sin(3\omega t - 26^\circ) \end{cases} \quad (15)$$

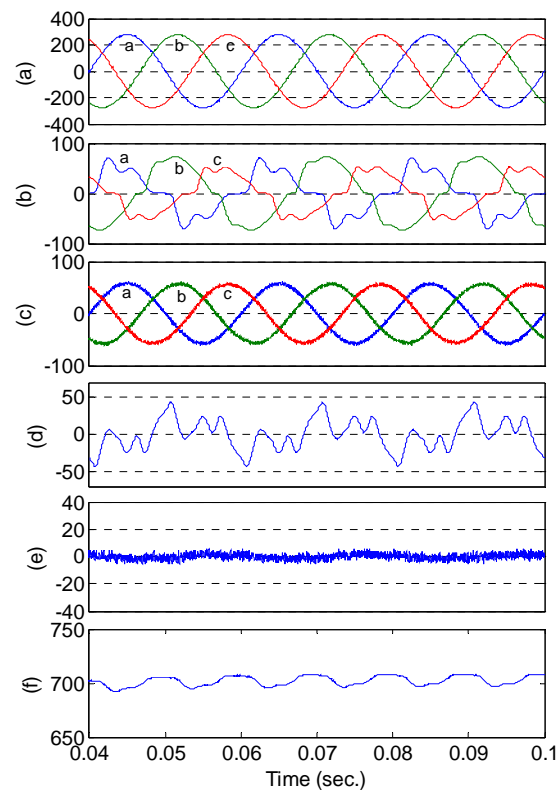
شکل ۳ ولتاژ معرفی شده در (۱۵) را به همراه مولفه‌های مختلف آن نمایش می‌دهد. شکل ۳(a) شکل موج کامل ولتاژ $v(t)$ ، شکل ۳(b) مولفه مثبت ولتاژ $v^+(t)$ ، شکل ۳(c) مولفه مثبت هارمونیک پایه $v_1^+(t)$ ، شکل ۳(d) مولفه منفی ولتاژ



شکل ۳. a- ولتاژ سه فاز ایده‌آل (V) ، b- جریان‌های اعوجاجی و نامتعادل (V) ، c- مولفه ترتیب مثبت ولتاژ (V) ، d- مولفه ترتیب مثبت هارمونیک پایه ولتاژ (V) ، e- مولفه ترتیب منفی ولتاژ (V) .

و شکل ۳(e) مولفه صفر ولتاژ $v^0(t)$ را نمایش می‌دهند. جهت مقایسه عملکرد روش‌های جبران‌سازی معرفی شده در بخش‌های قبل، نتایج حاصل از هر کدام را بررسی می‌نمائیم.

کشیده شدن جریان‌های سینوسی و هم‌فاز با ولتاژ از منبع را سبب می‌شود. در نتیجه جریان دامنه بالای نول منبع، بعد از جبران‌سازی حذف می‌گردد. شکل ۲(f) ولتاژ لینک DC را بعد از جبران‌سازی ذکر شده نمایش می‌دهد که توسط کنترل-کننده PI حول مقدار 700V کنترل می‌گردد و با فرکانس پایه 100Hz نوسان دامنه پائینی حول این مقدار دارد. باید توجه داشت که تقریباً هرگز ولتاژی ایده‌آل به فرم فوق، جهت تغذیه بار فراهم نخواهد بود. بخصوص اگر بار، غیر خطی باشد و جریانی نامتعادل و غیرخطی را نتیجه دهد.



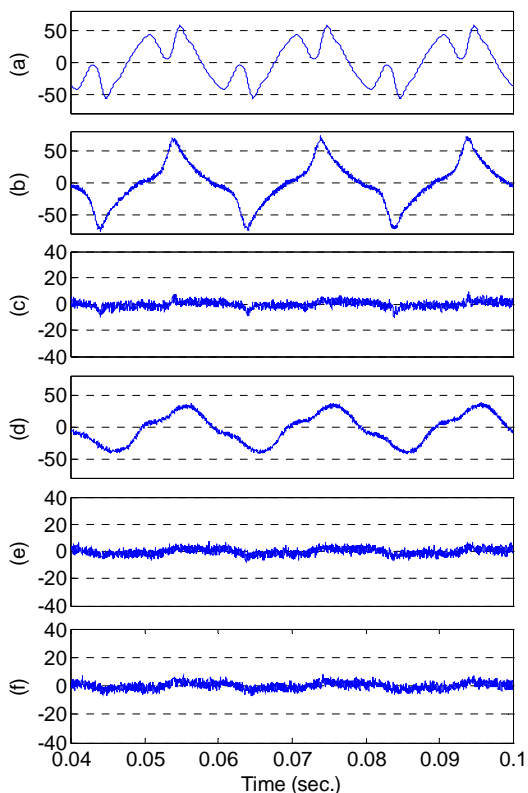
شکل ۲. a- ولتاژ سه فاز ایده‌آل (V) ، b- جریان‌های اعوجاجی و نامتقارن بار (A) ، c- جریان‌های سه فاز منبع (A) پس از جبران‌سازی با روش GTIP، d- جریان نول سمت بار (A) ، e- جریان نول سمت منبع (A) ، f- ولتاژ خازن سمت DC (V)

۲-۴. حالت دوم، شبیه‌سازی در حضور ولتاژ غیر ایده‌آل سر بار

در حالت دوم، ولتاژی نامتعادل و اعوجاجی در نظر گرفته شده‌است که مقادیر آن برای فازها به شکل زیر است:

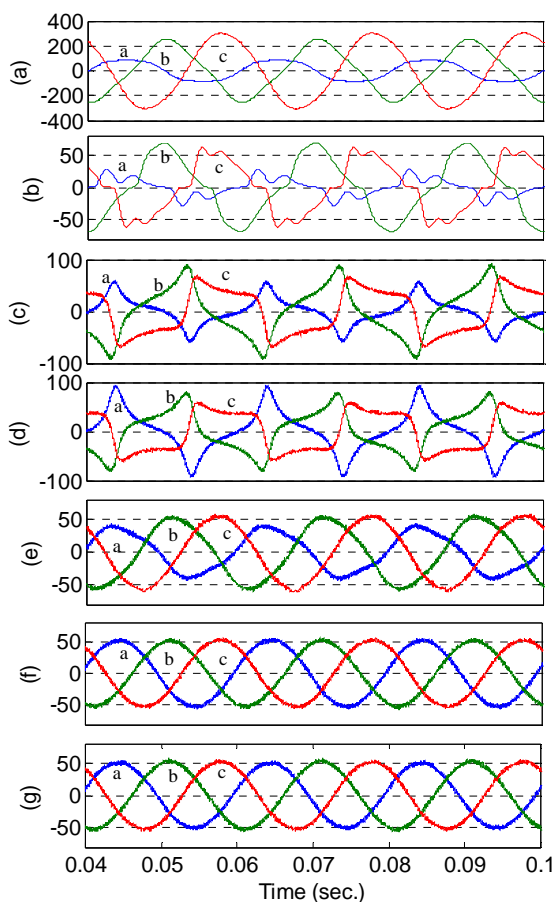
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

در واقع بجهت حضور مولفه‌های مختلف در ولتاژ سر بار و تاثیرپذیری *GTIP* از وجود آنها جریان منبع بعد از جبران-سازي اعوجاجی و نامتعادل گردیده و جریان غیر صفر نول منبع را نتیجه می‌دهد. جهت تایید مطالب ذکر شده در ارتباط با مولفه‌های مختلف ولتاژ، در این قسمت روش‌های جبران-سازي معرفی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۵. a- جریان نول سمت بار (A)، جریان نول سمت منبع (A) پس از جبران‌سازی با b- روش *GTIP*، c- روش *Z_GTIP*، d- روش *N_GTIP*، e- روش *P_GTIP*، f- روش *A_GTIP*

با اعمال روش *Z_GTIP* جریان نول منبع (شکل ۵(c)) بصورت کامل حذف گردیده است که نشان‌دهنده ارتباط موجود بین ولتاژ مولفه صفر و جریان نول می‌باشد. با این حال طبق شکل ۴(d) اعوجاجات جریان حذف نشده است که بعلت حضور سایر مولفه‌ها در ولتاژ جبران‌سازی می‌باشد. شکل ۶(b) نیز نشان‌دهنده ولتاژ خازن *DC* می‌باشد که



شکل ۴. a- ولتاژ سه‌فاز اعوجاجی و نامتعادل (V)، b- جریان‌های اعوجاجی و نامتقارن بار (A)، جریان‌های سه فاز منبع (A) پس از جبران-سازي با c- روش *GTIP*، d- روش *Z_GTIP*، e- روش *N_GTIP*، f- روش *P_GTIP*، g- روش *A_GTIP*

توجه گردد که جهت انجام مقایسه‌های شفاف و گویا بین روش‌های جبران‌سازی مورد نظر، عدم تعادل و اعوجاج در شکل موج‌های فوق بصورت غلو شده ارائه گردیده است. شکل موج ولتاژ و جریان نامتعادل و اعوجاجی ناشی از آن در شکل‌های ۴(a) و ۴(b) نمایش داده شده‌اند. جریان بار شدیداً هارمونیک و نامتعادل می‌باشد که جریان نول شکل ۵(a) با دامنه بالا را نتیجه می‌دهد. شکل‌های ۴(c)، ۵(b) و ۶(a) به ترتیب جریان منبع $(i_s(t))$ ، جریان سیم نول منبع $(i_{sn}(t))$ و ولتاژ خازن *DC* جبران‌ساز را بعد از جبران‌سازی از طریق روش *GTIP* نمایش می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌گردد در شرایط غیرایده‌آل جبران‌سازی دچار مشکل گردیده است.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

باشد. بنابراین مزایای استفاده از روش N_GTIP کاهش اعوجاجات جریان منبع و ولتاژ سمت DC می‌باشد.

با اعمال روش جبران‌سازی P_GTIP بدلیل عدم وجود مولفه صفر در ولتاژ جبران‌سازی آن، طبق شکل ۵(e)، جریان نول منبع بصورت کامل حذف می‌گردد. همچنین، بدلیل کاسته شدن مولفه منفی از ولتاژ جبران‌سازی در این روش، طبق شکل ۴(f)، اعوجاجات جریان منبع و طبق شکل ۶(d)، نوسانات ولتاژ DC به میزان بسیار بالایی جبران می‌شود. با این حال، به علت وجود هارمونیک‌های غیر از هارمونیک پایه در ولتاژ جبران‌سازی، حذف کامل اعوجاجات جریان منبع ممکن نمی‌باشد. مسلماً، دامنه این بخش از اعوجاجات جریان رابطه مستقیم با دامنه هارمونیک‌های موجود در ولتاژ جبران‌سازی دارد.

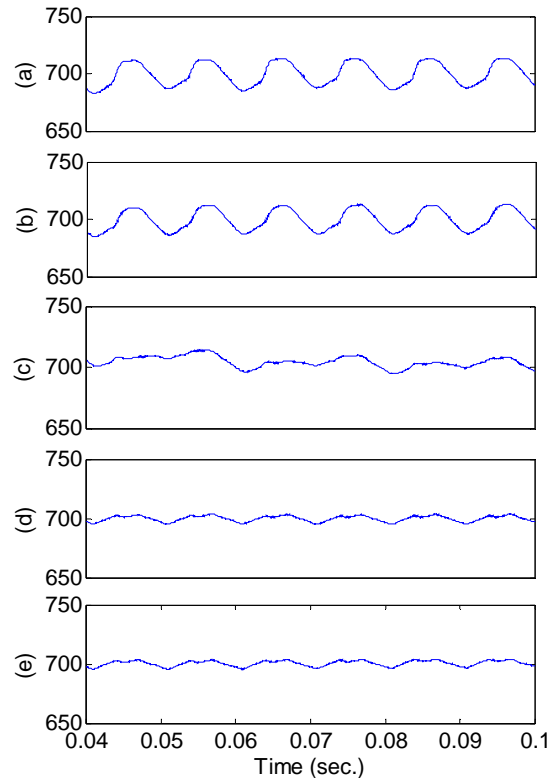
شکل ۴(g) جریان منبع بعد از جبران‌سازی از طریق A_GTIP را نمایش می‌دهد. واضح است که هارمونیک‌ها و عدم تعادل بصورت کامل جبران‌گردیده است. جریان نول منبع، طبق شکل ۵(f)، بصورت کامل حذف شده است و نوسانات ولتاژ سمت DC مبدل، طبق شکل ۶(e)، در پایین‌ترین مقدار خود نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

جدول (۲) نشان دهنده مقادیر موثر جریان سیم نول منبع برای روش‌های مختلف جبران‌سازی در کنار حالت جبران نشده را نمایش می‌دهد. همچنین، جدول (۳) مقادیر THD جریان منبع را برای حالات فوق می‌باشد.

جدول ۲: مقادیر موثر جریان نول منبع (A) بعد از جبران‌سازی

	Case 1	Case 2
Uncompensated	20.3	30.97
$GTIP$	2.11	33.6
Z_GTIP	2.11	2.48
N_GTIP	2.10	23.16
P_GTIP	2.11	2.38
A_GTIP	2.10	2.36

چندان تفاوتی با مقدار آن در روش $GTIP$ ندارد. این مطلب نشان‌دهنده عدم تأثیرپذیری این ولتاژ از ولتاژ مولفه صفر است.



شکل ۶. ولتاژ خازن سمت DC (V) پس از جبران‌سازی با a- روش $GTIP$ ، b- روش Z_GTIP ، c- روش N_GTIP ، d- روش P_GTIP ، e- روش A_GTIP

شکل ۴(e) جریان منبع بعد از جبران‌سازی از طریق N_GTIP را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که اعوجاج جریان منبع به میزان بالایی کاهش یافته است. این کاهش، ارتباط مولفه منفی ولتاژ با اعوجاج جریان را نشان می‌دهد. با این حال، طبق شکل ۵(d)، حضور مولفه صفر در ولتاژ جبران‌سازی عدم حذف کامل جریان نول منبع را موجب می‌گردد. نتیجه جالبی که از اعمال روش N_GTIP ظاهر می‌شود کاهش چشمگیر نوسان ولتاژ خازن DC طبق شکل ۶(c) می‌باشد. در واقع این مطلب قابل استنباط است که نوسان لینک DC در ساختمان مبدل فیلتر اکتیو تحت تأثیر ولتاژ مولفه منفی جبران‌سازی می‌-

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

مراجع

- [1] Green T.C., Marks J.H.: 'Control techniques for active power filters', IEE Proc., Electr. Power Appl., 2005, Vol. 152, (2), pp. 369-381
- [2] Peng F. Z., Lai J. S.: 'Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems' *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1996, Vol. 45, (1), pp. 293-297
- [3] Peng F.Z., Ott G.W., Adams D.J.: 'Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems', *IEEE Trans. Power Electron*, 1998, Vol. 13, (6), pp. 1174-1181
- [4] Tavakoli Bina M.: 'A New Complementary Approach to Inactive Power Compensation', *Power Electron. Specialists Conf., PESC'03, IEEE 34th Annual, Electronic Record, June 2003*, pp. 1542-1547
- [5] Zakeri A.F., Kanzi K., Tavakoli Bina M.: 'A New Approach to Compensation of Instantaneous Inactive power', *Electric Machines & Drives Conference, IEMDC '07, Antalya, Turkey, 2007*, pp. 624-629
- [6] Depenbrock M.: 'The FBD-Method, A Generally Applicable Tool for Analyzing Relations', *IEEE Trans. On Power Sys.*, 1993, 8, (2), pp. 381-387
- [7] Depenbrock M., Staudt V., Wrede H.: 'A Theoretical Investigation of Original and Modified Instantaneous Power Theory Applied to Four-Wire Systems', *IEEE Trans. On Industry Appl.*, 2003, 39, (4), pp. 1160-1167
- [8] Staudt V.: 'Fryze - Buchholz - Depenbrock: A time-domain power theory', *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, Lagow, Poland, 2008*, pp. 1-12
- [9] Emanuel A.E.: 'The Buchholz-Goodhue Apparent Power Definition: The Practical Approach for Nonsinusoidal and Unbalanced Systems', *IEEE Trans. On Power Delivery*, 1998, 13, (2), pp. 344-350
- [10] Fryze S., 'Effective wattles and apparent power in electrical circuits for the case of non sinusoidal waveform of current and voltage', in *elektrotechnische zeitschr.*, 1932, vol. 53, pp. 596-599.
- [11] Bradaschia F., Arruda J. P., Souza H.E.P., Azevedo G.M.S., Neves F.A.S., Cavalcanti M.C.: 'A Method for Extracting the Fundamental Frequency Positive-Sequence Voltage Vector Based on Simple Mathematical Transformations', *IEEE Power Electron. Specialists Conf., PESC'08, Rhodes, Greece, 2008*, pp. 1115-1121
- [12] Holtz J.: 'Pulse width Modulation-A survey', *IEEE Trans. Industrial Elect.*, 1992, Vol. 39, (5), pp. 410-420
- [13] Tavakoli Bina M., Pashajavid E.: 'An Efficient Procedure to Design Passive LCL-filters for Active Power Filters', *Electr. Power Syst. Res.*, 2008, Vol. 79, (4), pp. 606-614

جدول ۳. مقادیر $THD\%$ جریان‌های منبع بعد از جبران‌سازی

Phases	Case 1			Case 2		
	A	B	C	A	B	C
Uncompen.	34	11.35	20.05	47.56	17.29	22.69
<i>GTIP</i>	3.8	3.9	4.0	45.51	35.12	40.85
<i>Z_GTIP</i>	3.7	3.9	3.8	42.61	42.06	42.93
<i>N_GTIP</i>	3.9	3.8	3.9	12.92	7.01	4.09
<i>P_GTIP</i>	3.8	3.9	3.9	4.36	4.33	4.27
<i>A_GTIP</i>	3.8	3.9	3.9	4.25	4.12	4.08

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد فیلتر اکتیو قدرت با روش کنترل تئوری عمومی توان راکتیو لحظه‌ای (*GTIP*) در حضور عدم تعادل و یا هارمونیک‌های ولتاژی در استخراج جریان‌های مرجع جبران‌سازی ارائه گردید. جبران‌سازی با این روش در عمل و در حضور عدم تعادل و یا هارمونیک‌های ولتاژی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مقاله حاضر با مرور تئوری توان لحظه‌ای *FBD* آغاز گردید که بر اساس بهینه‌سازی قابل استحصال است. سپس، با استخراج رابطه موجود بین *FBD* و *GTIP*، از تعاریف *FBD* جهت تحلیل نحوه عملکرد *GTIP* تحت شرایط غیرایده‌آل و آشکار نمودن نقاط ضعف آن استفاده شد. اثبات گردید که علت ضعف عمده روش *GTIP* تحت شرایط فوق، تاثیر پذیری عملکرد آن از حضور مولفه‌های مختلف ترتیبی در ولتاژ سر بار و همچنین هارمونیک‌های آن می‌باشد. ایده‌های نوین و روش‌های جدید *Z_GTIP* جهت حذف جریان نول منبع ناشی از مولفه صفر ولتاژ، *N_GTIP* جهت حذف اعوجاج ناشی از مولفه منفی ولتاژ و *P_GTIP* جهت حذف هم‌زمان اثر مولفه منفی و صفر ولتاژ بر جبران‌سازی معرفی گردید. در نهایت نشان داده شد که روش *A_GTIP* جهت جبران‌سازی کامل جریان منبع، عملکرد کاملی دارد. شبیه‌سازی‌های مختلف انجام یافته با *MATLAB* جهت تایید مطالب مطرح شده، ارائه گردید.