

الگوریتم جبرانسازی بر پایه تئوری جامع تکمیلی توان‌های لحظه‌ای (A-GTIP) برای سوئیچ کردن جبران‌سازها و امکان پایداری فرکانسی در میکروگریدها

بیژن رحمانی
محمد توکلی بینا
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

واژه‌های کلیدی: تئوری جامع تکمیلی توان (A-GTIP)، مولفه‌ی فیزیکی جریان (CPC)، میکروگرید، جبران‌سازهای سوئیچ‌شونده

چکیده

مهمترین هدف این مقاله مقایسه‌ی کاربرد و عملکرد یک جبران‌ساز سوئیچ‌شونده در هنگام کنترل با الگوریتم‌هایی برپایه تئوری جامع تکمیلی توان‌های لحظه‌ای¹ (A-GTIP) و تئوری مولفه‌های فیزیکی جریان² (CPC) با در نظر گرفتن عملکرد میکروگرید میباشد. یک سیستم قدرت با بار نامتعادل و تحت شرایط سینوسی، به عنوان مثالی برای نشان دادن قابلیت سنجش توان‌های لحظه‌ای و جبران‌سازی برپایه تئوری‌های مذکور ارائه میگردد. توان حقیقی نوسانی لحظه‌ای تعریف شده در A-GTIP، مقدار انرژی نوسانی بین منبع و بار را نشان میدهد و برای جبران‌سازی آن باید از جبران‌ساز سوئیچ‌شونده‌ای استفاده شود که دارای یک المان ذخیره انرژی برای تبادل انرژی با بار باشد. شبیه‌سازی‌های انجام گرفته انعطاف‌پذیری الگوریتم جبران‌سازی بر پایه تئوری A-GTIP را نشان میدهند.

1. مقدمه

فیلترهای اکتیو توان به عنوان یکی از مهمترین وسایل برای میراسازی هارمونیک و همچنین برای جبران‌سازی توان راکتیو، متعادل کردن جریان منبع، رگولاسیون ولتاژ و

جبران‌سازی فلیکرولتاژ به کار میروند. این دامنه گسترده‌ی اهداف هم بصورت جداگانه و هم بصورت ترکیبی انجام میگردد که متناسب با اهداف، مطلوب‌ساز، الگوریتم کنترلی و ساختاری منحصر بفرد خواهد داشت. الگوریتم کنترلی یکی از زیرسیستم‌های فعال‌سازی فیلتر اکتیو میباشد. کارآیی الگوریتم-کنترلی، متناسب با دقت سیگنال‌های مرجع ایجاد شده که حاوی اطلاعاتی درباره‌ی جریانها و ولتاژها در نقطه‌ی اتصال فیلتر اکتیو به سیستم می‌باشند ارزش‌گذاری میشود. به منظور حذف مولفه‌های نامطلوب جریان، الگوریتم کنترلی انتخاب شده برای فیلتر اکتیو بایستی قادر به تشخیص هارمونیک‌های فرکانس بالا، توان راکتیو (که در محدوده‌ی فرکانس پایه می‌باشد) و مولفه‌های توالی منفی موجود در جریان باشد. در این مقاله مقایسه‌ای بین دو الگوریتم کنترلی بر پایه تئوری تکمیلی GTIP یا (A-GTIP) و تئوری مولفه‌های فیزیکی جریان صورت می‌گیرد [1]-[3], [4]-[7]. تئوری جامع تکمیلی توان‌های لحظه‌ای سه‌فاز A-GTIP در واقع روش بسط‌داده‌شده‌ی تئوری پیشنهاد شده در [1] است و برای حالتی که سیستم قدرت سه‌فاز چهار سیمه، نامتعادل و یا اغتشاشی باشد تئوری تکمیلی A-GTIP در میراسازی هارمونیک و حذف جریان مولفه صفر منبع، نتایج عملی قابل قبولی را بر خلاف

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

برای تمام حالت‌های، جریان‌ها و ولتاژهای غیر سینوسی، بسط داده شده است، پس برای ایجاد نتایج قابل قبول در چنین سیستم‌هایی، این تئوری بایستی قادر به عملکرد تحت هر حالت خاص در این سیستم‌ها باشد. سیستم سه سیمه سه فاز با ولتاژها و جریان‌های سینوسی به عنوان یک زیرسیستم با روابط آسان و قابل فهم برای بررسی پدیده‌های توان می‌باشد. بنابراین، خصوصیات تئوری A-GTIP در چنین سیستم ساده ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. انتخاب تئوری A-GTIP تنها بخاطر محدودیت نوشتاری می‌باشد، از آنجاکه تئوری A-GTIP از روش بهینه برگرفته شده و روش بهینه خود به عنوان پایه تقریباً تمام روش‌های مطرح شده در حوزه‌ی زمان می‌باشد، بیشتر نتایج گرفته شده قابل بسط به تمام تئوری‌های دیگر نیز می‌باشد. تمرکز این مقایسه بر روی عملکرد مطلوب‌سازهای توانی (جبرانسازهای سوئیچ شونده) است که در میکروگریدها (که سیستم‌های ضعیفی به حساب می‌آیند) بکار می‌روند و با ذخیره مختصر انرژی، نوسانات توان اکتیو در این سیستم‌ها را جبران می‌کنند. در حقیقت در یک میکروگرید نوسان‌توان ممکن است بخاطر نوسان بار یا نوسان در منابع انرژی تجدید شونده مانند منابع بادی اتفاق افتد. در [16] دامنه‌ی تغییر-فرکانسی باد و در [17] نوسانات پیش‌جشی گشتاور میکروگریدها که بایستی میرا گردد تا باعث تغییر فرکانس نشوند مطالعه شده است. در [18] به بررسی مشکلات تغییرات توان ایجاد شده بوسیله‌ی ژنراتورهای بادی متصل به سیستم‌های ضعیف می‌پردازد و راه‌حلهایی را ارائه می‌کند. از آنجا که، تئوری CPC دارای محاسباتی در محدوده فرکانس-پایه می‌باشد و مولفه‌های هارمونیک توان دارای نوسانات پایین‌تر از فرکانس خط می‌باشند، این امر پیاده‌سازی تئوری CPC را بدلیل تخمین‌های زیاد دشوار می‌سازد. این مقاله بترتیب زیر ارائه خواهد شد که در بخش دوم تئوری تکمیلی توان‌های لحظه‌ای (A-GTIP) مشتق شده از GTIP بررسی می‌شود. در ادامه در بخش سه تئوری توان CPC (مولفه‌های فیزیکی جریان) در سیستم‌های الکتریکی سه فاز توضیح داده می‌شود. در بخش چهارم با ارائه مطالعه موردی یک میکروگرید، تمام

تئوری‌های قبلی ارائه می‌دهد [2]. تئوری تکمیلی GTIP در کلیه مدارهای سه‌فاز برقرار بوده و اساس این روش بر پایه جداسازی لحظه‌ای مولفه‌های توالی مثبت و منفی (غیرهم-جهت) از مولفه‌های توالی صفر (هم‌جهت) می‌باشد که در ولتاژها و جریان‌های لحظه‌ای سه‌فاز چهارسیمه مطرح می‌گردد. تعاریف دیگری برای توان در حوزه زمان صورت گرفته است که مهمترین آنها روش بهینه (OS) ارائه شده در [8] است. روش بهینه ساختار ساده‌ای دارد و برای سیستم‌های-قدرت ایزوله کاملاً عملی می‌باشد. با روش کنترلی تکمیلی [9]، روش بهینه اصلاح شده می‌تواند برای سیستم‌های چهارسیمه نامتعادل استفاده شود. در [2]-[3]، با تجزیه و تحلیل روش بهینه و با استفاده از آنالیزهای پایه‌ای، دیگر تعاریف-توان‌ها از روش بهینه، نتیجه گرفته می‌شوند و روش بهینه به عنوان پایه‌ای برای تئوری جامع توان GTIP معرفی می‌گردد. از دیگر تئوری‌های مطرح شده میتوان به تئوری FBD در [10]، CPT (تئوری توان ذخیره‌ای) ارائه شده در [11] و تئوری p-q-r در [12]-[14] اشاره کرد. در [14] مقایسه‌ای بین تئوری p-q و p-q-r صورت گرفته و در محدوده‌ی فرکانس، تئوری CPC در [4] پیشنهاد شده است. اگرچه تئوری تکمیلی توان GTIP یا (A-GTIP) به عنوان یک تئوری مدرن شناخته شده است، در-محدوده‌ی تعاریف توان دارای برداشتهایی نادرست می‌باشد. این برداشتهای نادرست زمانی رخ می‌دهند که جریان‌های حقیقی و موهومی بدست آمده از تئوری تکمیلی GTIP به‌طور مستقیم با جریان‌های اکتیو و غیراکتیو تعریف شده بوسیله‌ی فریز [15] در سال 1932 مقایسه می‌شوند.

همانطور که در ادامه در این مقاله توضیح داده می‌شود، تنها در صورت در نظر گرفتن محدودیتهایی این مولفه‌های جریان قابل مقایسه می‌باشند. بمنظور توضیح جنبه‌های، برداشت‌های نادرست تئوری توان A-GTIP، در این مقاله مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های کنترلی بر پایه تئوری تکمیلی GTIP و CPC بمنظور سوئیچ کردن جبرانسازها مطرح می‌گردد. تئوری مولفه-های فیزیکی جریان [4]-[7] به عنوان مرجعی برای این مطالعه استفاده می‌شود. از آنجا که تئوری A-GTIP در سیستم‌های سه‌فاز

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

(۳)

$$\begin{cases} i_s(t) = i_s^+(t) + i_s^-(t) \\ i_s^+(t) = \lambda v^+(t) \\ i_s^-(t) = \lambda v^-(t) \\ \lambda = \frac{\bar{p}(t)}{v(t) \cdot v(t)} \end{cases}$$

روابط (۱)–(۳) نشان می‌دهند مولفه‌های ولتاژ ترمینال بار مرتبط با توالی جریان طرف منبع میباشند. به بیان دیگر حتی بعد از جبرانسازی، ولتاژ توالی منفی بار $v^-(t)$ موجب ایجاد $i_s^-(t)$ در منبع شده و باعث تحمیل اغتشاش و نامتعادلی در سمت جریان منبع و کاهش ضریب توان میگردد. علاوه بر آن مسئله‌ای که بایستی به آن توجه شود جمله $v(t) \cdot v(t)$ است که در (۳) ظاهر میشود و بدلیل حضور هارمونیک‌های مراتب متعدد سبب ایجاد اعوجاج در جریان منبع میشود. تئوری A-GTIP جهت برطرف کردن نقایص بیان شده راه‌های زیر را پیشنهاد میدهد:

- راه حل غلبه بر مولفه ی توالی منفی جایگزینی $v(t)$ با $v^+(t)$ در (۳) بصورت زیر میباشد.

(۴)

$$i_s(t) = \frac{\bar{p}(t)}{v^+(t) \cdot v^+(t)} v^+(t)$$

- اگرچه مولفه‌ی توالی منفی جریان در رابطه‌ی (۴) حذف میشود اما جریان‌های منبع تنها در صورتیکه $v^+(t)$ دارای هیچ مولفه‌ی هارمونیک نباشد بصورت کاملا سینوسی در خواهند آمد. با در نظر گرفتن $v_1^+(t)$ به عنوان جزء پایه‌ای $v^+(t)$ ، جریان منبع پس از جبرانسازی بصورت زیر در خواهد آمد.

(۵)

$$i_s(t) = \frac{\bar{p}(t)}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} v_1^+(t)$$

تحت این شرایط $v_1^+(t)$ تنها قسمت متوسط را شامل میشود و منبع هیچ "توان راکتیوی" را تولید نمیکند. کاملا آشکار است که توان اکتیو تامین شده بوسیله‌ی منبع به اندازه‌ی توان متوسط منتقل شده به بار میباشد و بنابراین جریان‌های منبع متعادل و سینوسی خواهند ماند و ضریب توان بصورت واحد در خواهد آمد. باقیمانده توان اکتیو مورد نیاز بار (توان

خصوصیات تئوری A-GTIP و تئوری مولفه‌های فیزیکی - جریان بررسی میشود. در بخش پنج، شبیه‌سازیهای صورت داده شده در محیط Matlab-Simulink از تئوری A-GTIP در جبران توان حقیقی نوسانی ایجاد شده بر اثر بار و منبع، در یک میکروگرید بهره میگیرد. سرانجام در بخش آخر نتایج برجسته‌ی حاصل شده از این مقاله ارائه میگردد.

۲. تئوری تکمیلی A-GTIP

تئوری A-GTIP تعریفی کلی از توان راکتیو لحظه‌ای در سیستم‌های قدرت سه‌فاز، ارائه میدهد که تحت شرایط سینوسی یا غیرسینوسی، متعادل یا نامتعادل در سیستم‌های قدرت سه‌فاز یا بدون جریانها و یا ولتاژهای مولفه اغتشاشی برقرار میباشد. با تعریف بردار ولتاژهای لحظه‌ای $[v_a, v_b, v_c]^t$ و جریان‌های لحظه‌ای $[i_a, i_b, i_c]^t$ توان اکتیو (p) و راکتیو (q) لحظه‌ای سه‌فاز از روابط زیر بدست می‌آیند:

(۱)

$$\begin{cases} p = v \cdot i = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \\ q \stackrel{\text{def}}{=} v \times i \end{cases}$$

طول بردار q میزان توان راکتیو لحظه‌ای را نشان میدهد. بردار جریان اکتیو لحظه‌ای i_p ، جریان راکتیو لحظه‌ای i_q ، توان ظاهری لحظه‌ای S و ضریب توان لحظه‌ای PF بصورت زیر تعریف میشوند [1]:

(۲)

$$\begin{cases} i_p = [i_{ap}, i_{bp}, i_{cp}]^t \stackrel{\text{def}}{=} \frac{p}{v \cdot v} v \\ i_q = [i_{aq}, i_{bq}, i_{cq}]^t \stackrel{\text{def}}{=} \frac{q}{v \cdot v} v \\ S \stackrel{\text{def}}{=} v i \\ PF \stackrel{\text{def}}{=} \frac{p}{S} \\ v = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \\ i = \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2} \end{cases}$$

اگر فرض شود ولتاژ ترمینال بار $v(t)$ در یک سیستم سه فاز سه‌سیمه شامل مولفه‌های مثبت $v^+(t)$ و منفی $v^-(t)$ باشد [19][20]، از روش بهینه [8][9] میتوان جریان منبع را بعد از جبرانسازی به شکل زیر بازسازی کرد:

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

قسمتی از جریان خطوط، مربوط به بار مقاومتی معادل است و با حداقل جریان اکتیو مورد نیاز برای انتقال انرژی پایدار به باری با توان P معادل می‌باشد. قسمت باقیمانده جریان منبع $(i - i_a)$ به انرژی انتقالی مربوط نمی‌باشد. این بخش بی-استفاده بوده اما باعث افزایش مقدار RMS جریان منبع تغذیه می‌شود. این رابطه نشان می‌دهد که جریان بی-استفاده در خطوط تغذیه از دو بخش تشکیل می‌شود:

$$\begin{cases} i_R = \sqrt{2} \operatorname{Re}(jB_e U e^{j\omega_1 t}) \\ i_U = \sqrt{2} \operatorname{Re}(A U^\# e^{j\omega_1 t}) \end{cases} \quad (9)$$

مولفه اول جریان راکتیو است و در صورتی وجود دارد که سوسپتانس معادل (B_e) مربوط به بار صفر نباشد. مولفه دوم تنها در صورتی در جریان منبع وجود خواهد داشت که ضریب A مخالف صفر باشد. این ضریب تنها موقعی صفر است که $Y_{RS} = Y_{ST} = Y_{TR}$ یعنی سیستم متعادل باشد. از آنجاکه بردار ولتاژ $u^\#$ دارای توالی منفی است، بنابراین جریان نامتعادلی (i_U) نیز دارای توالی منفی بوده و باعث عدم تقارن جریان می‌شود. مولفه‌های جریان منبع در سیستم‌های سه‌فاز $(i = i_a + i_r + i_u)$ با پارامترهای G_e ، B_e و A بار مرتبط می‌باشند. این مولفه‌های جریان به طور جداگانه به سه پدیده‌ی فیزیکی متمایز در مدار مربوط می‌شوند:

- تبدیل انرژی پایدار در بار بخاطر توان اکتیو آن
- شیفت فازی بین جریان متناسب با ولتاژ منبع بخاطر توان راکتیو بار
- جریان نامتقارن منبع بخاطر عدم تعادل بار

بنابراین، این جریان‌ها به عنوان مولفه‌های فیزیکی جریان منبع به حساب می‌آیند. مقادیر RMS آنها عبارتست از:

$$\begin{cases} \|i_a\| = G_e \|U\| \\ \|i_r\| = B_e \|U\| \\ \|i_u\| = A \|U\| \end{cases} \quad (10)$$

با ضرب مقادیر RMS مولفه‌های جریان در مقدار RMS ولتاژ تغذیه $\|U\|$ ، روابط مربوط به توان‌ها نتیجه می‌شود.

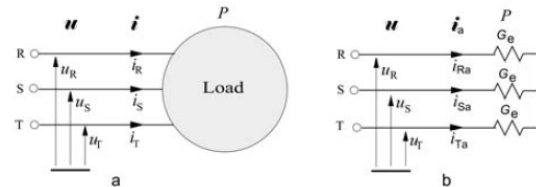
$$\begin{cases} Q = \|U\| \cdot \|i_r\| = -B_e \|U\|^2 \\ D = \|U\| \cdot \|i_u\| = A \|U\|^2 \\ S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \end{cases}$$

اکتیو نوسانی) بوسیله‌ی جبران‌کننده تامین می‌شود. با استفاده از رابطه‌ی (۵) جریان‌های مرجع جبرانسازی شده با استفاده از تئوری A-GTIP از رابطه‌ی زیر بدست می‌آیند.

$$i_c(t) = i(t) - \frac{\bar{p}(t)}{v_1^+(t) \cdot v_1^+(t)} v_1^+(t)$$

۳. تئوری مولفه‌های فیزیکی جریان

همانطور که در شکل (الف) ۱ نشان داده شده است بارهای خطی، نامتغییر با زمان در ولتاژهای متقارن سینوسی باتوالی مثبت را همیشه می‌توان با یک مجموعه مقاومت معادل و یک بار متعادل مانند شکل (ب) ۱ معادل کرد که در همان ولتاژ دارای توان اکتیو P مشابه با بار اصلی است.



شکل ۱: (الف) بار سه - فاز و (ب) بار معادل و توان اکتیو P یکسان

در شکل (ب) 1 توان اکتیو و مقدار کاندوکتانس معادل بار اصلی مرتبط با توان اکتیو در هر فاز برابر است با:

$$\begin{cases} P = \|U_R\|^2 G_e + \|U_S\|^2 G_e + \|U_T\|^2 G_e \\ G_e = \frac{P}{\|U_R\|^2 + \|U_S\|^2 + \|U_T\|^2} = \frac{P}{\|U\|^2} \end{cases}$$

و جریان خطوط بار برابر خواهند بود با:

$$\begin{cases} i_a = \begin{bmatrix} i_{Ra} \\ i_{Sa} \\ i_{Ta} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \operatorname{Re} \begin{bmatrix} G_e U_R \\ G_e U_S \\ G_e U_T \end{bmatrix} e^{j\omega_1 t} = G_e U \\ i - i_a = \sqrt{2} \operatorname{Re} \begin{bmatrix} Y_e U_R + A U_R - G_e U_R \\ Y_e U_S + A U_T - G_e U_T \\ Y_e U_T + A U_S - G_e U_S \end{bmatrix} e^{j\omega_1 t} \\ U = \begin{bmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{bmatrix}, \quad U^\# = \begin{bmatrix} U_R \\ U_T \\ U_S \end{bmatrix} \\ i - i_a = \sqrt{2} \operatorname{Re}(jB_e U + A U^\#) e^{j\omega_1 t} \\ A = -(Y_{ST} + \alpha Y_{TR} + \alpha^* Y_{RS}) \end{cases}$$

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

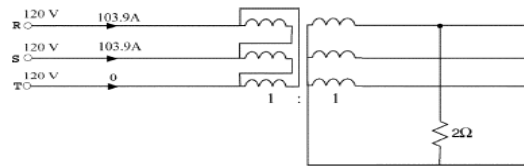
از روابط (۱۱) ارتباط بین توان‌های P ، Q و D با تعاریف توان در تئوری تکمیلی A-GTIP به صورت زیر مشخص می‌شود.

$$\begin{cases} p = 3U_R^2[G_e + A \cos(2\omega_1 t + \varphi)] \\ q = 3U_R^2[B_e - A \sin(2\omega_1 t + \varphi)] \\ p = P + D \cos(2\omega_1 t + \varphi) \\ q = -Q - D \sin(2\omega_1 t + \varphi) \end{cases} \quad (15)$$

در [6] نشان داده می‌شود که جریانهای اکتیو و راکتیو در سیستمی با ولتاژ کاملاً سینوسی که دارای بار خطی می‌باشد، تولید هارمونیک نمی‌کنند اما روابط (۱۳) نشان می‌دهند که جریانهای اکتیو و راکتیو لحظه‌ای بدست آمده از تئوری A-GTIP با تعاریف جریانهای اکتیو و راکتیو متداول در مهندسی برق تطابقی ندارند و مثال بالا نشان می‌دهد که در این تئوری هر دو جریان غیرسینوسی بوده و دارای هارمونیک مرتبه سوم می‌باشند. این نتیجه‌ی تئوری A-GTIP، در تعارض جدی با ایده‌ی جریان اکتیو تعریف شده در [15] می‌باشد. این بیان تئوری A-GTIP که جریان خطوط در سیستمی با بار خطی، که تولیدکننده‌ی مولفه‌های هارمونیک می‌باشد، دارای مولفه‌های غیرسینوسی است یکی از برجسته‌ترین تعابیر غلط این تئوری از پدیده‌های الکتریکی در مدارات سه فاز می‌باشد. مثال بالا نشان می‌دهد که تئوری تکمیلی توان A-GTIP مشخصات توان لحظه‌ای بار را به خوبی نشان نمی‌دهد و از آنجا که هر دو توان‌های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای محاسبه شده، کمیت‌هایی متغیر با زمان می‌باشند، مقادیر آنها در زمان واحد، بیان کننده هیچ یک از خصوصیات توانی بار نمی‌باشند. برای مثال، در لحظه‌ی $t = \tau$ اگر $(\omega_1 \tau + 30) = 0$ باشد، توان راکتیو برابر صفر بوده $q = 0$ و مانند این است که بار مقاومتی خالص و متعادل بوده باشد و این درحالی است که برای $t = \tau$ در صورتیکه $(\omega_1 \tau + 30) = 90$ شود، هر دو توان‌های اکتیو و راکتیو- لحظه‌ای برابر با صفر می‌باشند. بنابراین مشخصات توان مرتبط با بار را نمیتوان تا قبل از تمام شدن دوره‌ی تناوب تغییرشان صرفاً با مشاهدات انجام شده بر روی توان‌های p و q انجام داد اگرچه، ملاحظات انجام شده پس از تمام شدن این دوره تناوب بازهم بدون آنالیزهای مکمل، خصوصیات توان را

۴. مقایسه تئوری تکمیلی A-GTIP با تئوری مولفه‌های فیزیکی جریان

فرض کنید یک بار مقاومتی، همانند شکل 2 بوسیله‌ی یک منبع متقارن سینوسی $u_R = \sqrt{2}U \cos \omega_1 t$ و با ولتاژ توالی مثبت با دامنه‌ی $U = 120$ v در فرکانس پایه تغذیه می‌شود



شکل ۲: مثال نمونه درمقایسات مورد نظر

تئوری تکمیلی A-GTIP: با فرض $n=1$ و محاسبه‌ی مولفه‌های ولتاژ و جریان در مختصات متقارن [3]، توان‌های حقیقی و موهومی بصورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} \bar{p}_{\alpha\beta} = 21600 \text{ w} \\ \bar{q}_{\alpha\beta} = 21600 \cos(2\omega t + 60) \text{ w} \\ \bar{q}_{\alpha\beta} = -\sqrt{3} UI \sin 0 = 0 \\ \bar{q}_{\alpha\beta} = -21600 \cos(2\omega t + 60) \end{cases} \quad (12)$$

آنگاه با استفاده از روابط ارائه شده در [1] جریان‌های اکتیو و راکتیو فاز R برابر خواهند بود با:

$$\begin{cases} i_{R(\bar{p}+\bar{q})} = \frac{1}{\sqrt{6}} I [2 \cos \omega_1 t + \cos(\omega_1 t + 60) + \cos(3\omega_1 t + 60)] \\ i_{R(\bar{q}+\bar{q})} = \frac{1}{\sqrt{6}} I [\cos(\omega_1 t + 60) - \cos(3\omega_1 t + 60)] \end{cases}$$

$$i_R = i_{R(\bar{p}+\bar{q})} + i_{R(\bar{q}+\bar{q})} = 84.8 \cos(\omega_1 t + 30)$$

تئوری مولفه‌های فیزیکی جریان: با فرض $n=1$ و محاسبه مقادیر مولفه‌های فیزیکی جریان از روابط (۸) و (۹)، توان‌های حقیقی و موهومی از رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شوند:

$$(14)$$

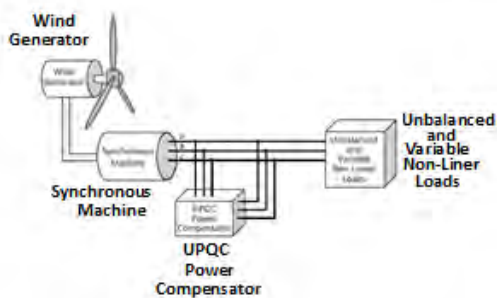
$$\begin{cases} p = 21600 \text{ w} \\ Q = 0 \\ D = 21600 \text{ var} \\ i = i_a + i_U = \begin{bmatrix} 84.8 \cos(\omega_1 t + 30) \\ 84.8 \cos(\omega_1 t - 150) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \\ i_T \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} p = U_\alpha i_\alpha + U_\beta i_\beta \\ q = U_\alpha i_\beta - U_\beta i_\alpha \end{cases} \end{cases}$$

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

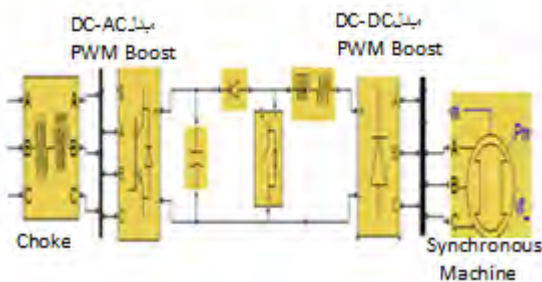
میافتد و این بواسطه‌ی حذف نشدن مولفه‌های هارمونیکی مرتبه سوم در i_p و یا i_q میباشد.

۵. کنترل فرکانس در میکرو گرید

برای نشان دادن قابلیت انعطاف‌پذیری تئوری A-GTIP نتایج شبیه‌سازیهای صورت‌گرفته در بررسی زیرسیستمی از یک میکروگرید نشان داده میشود. شکل ۳ زیرسیستم شبیه‌سازی شده شامل یک مزرعه‌ای بادی با ژنراتور القایی سرعت متغیر، بارهای غیرخطی نامتعادل و یک جبران‌ساز سری و موازی توان را نشان میدهد. سرعت متغیر باد، باعث تغییر فرکانسی ولتاژ میشود. این یک شرایط فرضی است، اگرچه امکان رخ دادن آن در یک میکروگرید واقعی وجود دارد. حضور یک جبران‌ساز توان اثر مهمی در جلوگیری از تغییرات فرکانسی دارد. مزرعه بادی با توان ۱۱ مگاوات متشکل از ۵ توربین بادی میباشد. مشخصات ژنراتور سنکرون و توربین بادی بترتیب در جداول ۱ و ۲ قابل مشاهده است. ژنراتور القایی سرعت متغیر امکان استخراج ماکزیمم انرژی از باد را برای سرعت‌های باد کم از طریق بهینه کردن سرعت توربین فراهم می‌آورد، در حالی که استرسهای مکانیکی وارد بر توربین در اثر نوسانات باد را نیز کاهش میدهد.



شکل ۳- میکروگرید شبیه‌سازی شده شامل یک ژنراتور بادی، بارهای غیرخطی نامتعادل و یک جبران‌ساز توان



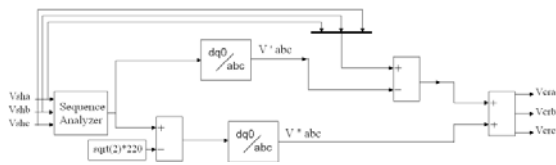
شکل ۴- دیاگرام ژنراتور سنکرون به کار رفته در مزرعه بادی

بازگو نمیکند. برای مثال، توان راکتیو q ، که برای مدار بررسی شده در مثال بالا بدست آمد توان راکتیو Q مورد نیاز بار نمیباشد و صرفاً به خاطر عدم تعادل بار این مقدار بدست آمده است. از آنجا که تئوری‌های توانی بر پایه محاسبات فرکانسی بخاطر تغییر با زمان، نیازمند مشاهده‌ی سیستم در یک دوره‌ی تناوب میباشد بنابراین تئوری تکمیلی A-GTIP در تعیین خصوصیات بار دارای هیچ مزیتی از نظر بازه زمانی بر تئوریهای توانی بر پایه محاسبات فرکانسی نمیباشد. مثال بالا نشان میدهد که جریان راکتیو لحظه‌ای دارای هیچ تناسبی با توان راکتیو بار، Q نمیباشد. از روابط (۱۳) دو نکته مهم حاصل میگردد:

- i_p و i_q دارای مولفه‌ی هارمونیک مرتبه سوم میباشد که در جریان اصلی وجود ندارد. علاوه بر آن هارمونیک مرتبه سوم مولفه اکتیو جریان، برابر با مقدار هارمونیک مرتبه سوم مولفه‌ی راکتیو میباشد اما با علامت مخالف، بنابراین جمع آنها برابر صفر بوده و در مدار ظاهر نمی‌شوند.
- اگر گین‌های کنترلی فیلتر اکتیو k_p و k_q دارای مقدار یکسانی باشند، مولفه‌های هارمونیکی مرتبه سوم به طور کامل در جریان منبع حذف میگردند اما در صورتیکه $k_p \neq k_q$ باشد مولفه‌های هارمونیک سوم توان در i_p باعث حذف مولفه‌های هارمونیکی مرتبه سوم در جریان i_q میشوند، بنابراین یک مولفه هارمونیکی که در جریان اصلی وجود نداشت در جریان منبع شکل میگردد.

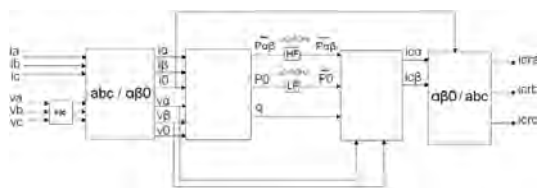
اگرچه با استفاده از تئوری A-GTIP امکان بهره‌گیری از فیلتر اکتیو توان برای جبران‌سازی تنها بخش موهومی توان یا تنها بخش نوسانی توان حقیقی وجود دارد و در حقیقت، امکان کنترل بخش‌های مختلف جبران‌سازی با این تئوری انعطاف‌پذیر وجود دارد، در صورتیکه از تئوری A-GTIP تنها بمنظور جبران‌سازی توان موهومی q و یا تنها توان حقیقی نوسانی \bar{p} استفاده شود در فرآیند فیلتر کردن، شرایط بدتری اتفاق

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۷- روند کلی جهت کنترل فیلتر اکتیو سری

۲. فیلتر اکتیو موازی (PF): با طراحی الگوریتم فعالسازی بر مبنای تئوری A-GTIP مولفه‌های اغتشاشی ولتاژ ترمینال بار در جریان منبع جبران شده و با تزریق توان اکتیو ولتاژ لینک DC کنترل می‌گردد.



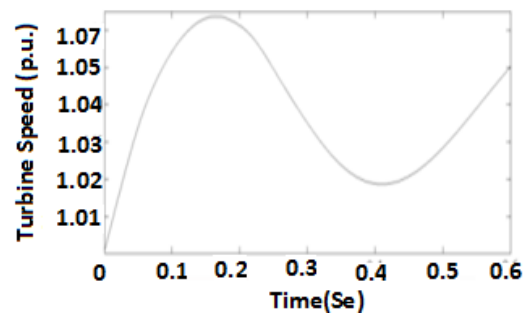
شکل ۸- دیاگرام کنترل فیلتر اکتیو موازی

در این شبیه‌سازی از تکنیک کنترلی جریان هیستریزس بعنوان تکنیک کنترلی مدولاسیون برای فرمان دادن به سوئیچها استفاده شده است.

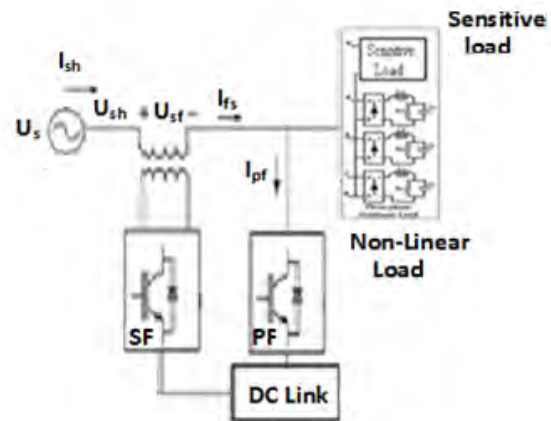
شکل (الف) ۹ نشان‌دهنده‌ی شکل موج ولتاژسیستم و جریان منبع، قبل از جبران‌سازی و در قسمت (ب) ۹ فیلتر اکتیو به- سیستم متصل شده و شکل نشان‌دهنده‌ی شکل موج ولتاژ سیستم و جریان منبع، بعد از جبران‌سازی میباشد. شکل‌های (الف) - (ب) ۹ بترتیب نشان‌دهنده‌ی توانهای اکتیو و راکتیو قبل و بعد از حالتی است که جبران‌ساز توان به سیستم متصل و توان‌های \bar{p} و q را جبران میکند. در این حالت، از \bar{p} در رابطه‌ی $\bar{p} = p - \bar{p}$ با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر برای محاسبه توان حقیقی متوسط \bar{p} استفاده میشود. همانطور که در این شبیه‌سازی دیده میشود ولتاژ و جریان اغتشاشی بطور گسترده کاهش یافته و مطابق با نتایج ذکر شده در مراجع [18] [16] اکنون قادر به کاهش نوسانات پیچشی گشتاور میکروگریدها بوده و فرکانس تحت کنترل میباشد. این شبیه سازی ساده نشان میدهد که با تئوری A-GTIP، جبران‌ساز - توان میتواند با جبران‌سازی توان نوسانی، بازده حداکثر سیستم الکتریکی را تضمین کند .

در این مدل از یک ژنراتور سنکرون متصل به یکسوساز دیودی (شکل ۴)، مبدل DC-DC PWM Boost دارای سوئیچ IGBT و مبدل DC/AC PWM دارای سوئیچ IGBT استفاده شده است.

در این مقاله، سرعت توربین بادی متغیر بوده که در شکل ۵ برای مدت زمان ۰/۶ ثانیه به صورت پریونیت در مبنای m/s ۱۱ نشان داده شده است. توان راکتیو تولید شده بوسیله توربین بادی برابر صفر تنظیم شده است.



شکل ۵- سرعت توربین بادی



شکل ۶- بلوک دیاگرام سیستم کنترلی جبران‌ساز سری- موازی با بار غیرخطی در مزرعه بادی

شکل ۶، نشان‌دهنده‌ی ساختار مطلوب‌ساز جامع کیفیت توان UPQC بکار رفته در این شبیه‌سازی است که شامل دو بخش اصلی میباشد:

۱. فیلتر اکتیو سری (SF): هارمونیک‌های ولتاژ منبع، کمبود و بیشبود ولتاژ را حذف نموده و هارمونیک‌های ناشی از بار خازنی یکسو شده را مجبور به عبور از فیلتر اکتیو موازی می‌کند.

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

این وجود، برخلاف تئوری CPC که در مدارات چهارسیمه جوابگو نمیباشد، A-GTIP با انعطاف‌پذیری بالا حتی قادر به جبران کامل مولفه نوسانی توان در میکروگریدها میباشد. علاوه بر آن تئوری CPC قادر به جداسازی تاثیرات توان حقیقی نوسانی از توان موهومی نوسانی نمیباشد. این یک محدودیتی عملی جدی در جبرانسازی است که میتواند باعث ایجاد نوسان‌های پیچشی گشتاور شده که تغییرات فرکانسی را خصوصاً در میکروگریدها در پی دارد. استفاده از تئوری A-GTIP، امکان طراحی یک جبران‌ساز با قابلیت حذف نوسانات توان حقیقی به منظور اجتناب از تغییرات فرکانس الکتریکی سیستم را داده و بازده حداکثر سیستم الکتریکی را تضمین میکند.

جدول ۱: پارامترهای ژنراتور سنکرون

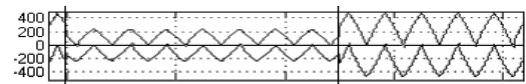
پارامتر	مقدار
ظرفیت	MW _۲
ولتاژ	V _{۵۷۵}
تعداد قطب	۲
ضریب توان	۰/۹
ثابت اینرسی	Sec. ۰/۶۲
مقاومت استاتور (پریونیت)	۰/۰۰۶
راکتانس سنکرون (پریونیت)	۱/۴۸۵

جدول ۲: پارامترهای توربین بادی

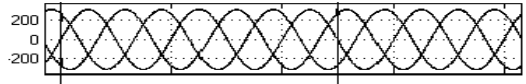
پارامتر	مقدار
تعداد	۵
ثابت میرایی شافت (پریونیت بر رادیان)	۸۰/۲۷
ثابت اینرسی	Sec. ۴/۳۲

۷. مراجع

- [1] F. Z. Peng, and J. S. Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Power Systems", IEEE 00189456/96\$05.00 0 1996.
- [2] E. Pashajavid and Mohammad Tavakoli Bina, "Zero-sequence component and Harmonic Compensation in four-wire Systems under Non-ideal Waveforms", PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 85 NR 10/2009.
- [3] Mohammad Tavakoli Bina, "Inactive Power Harmonics Control", ISBN: 964-94808-4-6, 2003, P 46-50.
- [4] Leszek S. Czarnecki, "Currents' Physical Components (CPC)

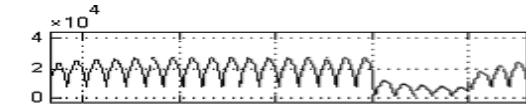


(الف)

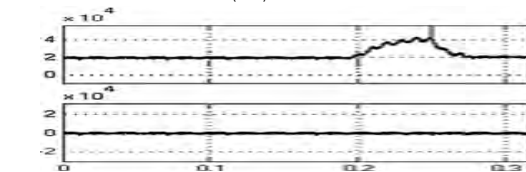


(ب)

شکل ۹_ الف) شکل موج ولتاژ سیستم و جریان منبع، قبل از جبرانسازی
ب) شکل موج شکل موج ها بعد از جبرانسازی



(الف)



(ب)

شکل ۱۰_ الف) شکل موجهای توان اکتیو و توان راکتیو انتقالی در سیستم قبل از جبرانسازی ب) شکل موجهای توان اکتیو و توان راکتیو انتقالی در سیستم بعد از جبرانسازی

۶. نتیجه‌گیری

این مقاله بصورت خلاصه به مقایسه تحلیلی انتقادی تئوریهای A-GTIP و CPC پرداخته و با استفاده از این تئوری‌ها به مطالعه‌ی موردی یک میکروگرید می‌پردازد. ضمن وجود نقاط مشترک بین تئوریهای A-GTIP و CPC اساساً تئوری تکمیلی A-GTIP و تقریباً تمام تئوری‌های ارائه شده در حوزه زمان دارای برداشت لحظه‌ای صحیحی از خصوصیات بار نمیباشند و مشخصات توان مرتبط با بار را نمی‌توانند تا قبل از تمام شدن دوره‌ی تناوب تغییرشان صرفاً با مشاهدات انجام شده بر روی توان‌های p و q انجام دهند. ملاحظات انجام شده پس از تمام شدن این دوره‌ی تناوب نیز بدون آنالیزهای مکمل بازمهم خصوصیات توان را بازگو نمیکنند. با

- [17] T. Goya, "Torsional Torque Suppression of Decentralized Generators Based on H_∞ Control Theory", International conference on Power System Transient (IPST'2009), Kyoto, 2-6 June 2009.
- [18] G. O. Suvire, "Mitigation of Problems Produced by Wind Generators in Weak Systems", Ph.D. Thesis, San Juan National University, Argentina, 2009. (In Spanish)
- [19] Gerardus C. Paap, "Symmetrical Components in the Time Domain and Their Application to Power Network Calculations ", IEEE Trans, On power systems, 15, No. 2, 522-528, 2000.
- [20] 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 Electronic Specialists Conf., PESC'08, Greece, 2008, 1115-1121
- In Circuits with Non-sinusoidal Voltages and Currents Part 2: Three-Phase Three-Wire Linear Circuits", Electrical Power Quality and Utilization, Journal ,Vol. xi, No2, 2005.
- [5] Leszek S. Czarnecki, "On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 19, NO. 3, MAY 2004.
- [6] Leszek S. Czarnecki, "Scattered and Reactive Current, Voltage, and Power in Circuits with Non-sinusoidal Waveforms and Their Compensation", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 40, NO. 3, JUNE 2004.
- [7] Leszek S. Czarnecki, "Reactive and Unbalanced Currents Compensation in Three-phase Asymmetrical Circuits Under Non-sinusoidal Conditions", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 38, NO. 3, JUNE 1989.
- [8] Leszek S. Czarnecki, "Minimization of Unbalanced and Reactive Currents in Three-Phase asymmetrical Circuits with Non-sinusoidal Voltage", IEE Proceedings-B, 139, No. 4, 347-354, 1992.
- [9] Mohammad Tavakoli Bina, "A New Complementary Method to Instantaneous Inactive Power Compensation", IEEE 0-7803-7754-0/03/\$17.00 02003.
- [10] M. Depenbrock, "The FBD-Method, a Generally Applicable Tool for Analysing Power Relations, " IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 381-387, May 1993.
- [11] P. Tenti, E. Tedeschi, P. Mattavelli, "Cooperative Operation of Active Power Filters by Instantaneous Complex Power Control", 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, November 2007.
- [12] H. S. Kim, H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating 694 p-q-r reference frames, " in Proc. IEEE/PEDS 1999 Conf., Hong Kong, Jul., pp. 422-427.
- [13] M. Depenbrock, V. Staudt, H. Wrede, "Concerning instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1151-1152, Jul. 2004.
- [14] M. Aredes, H. Akagi, E. H. Watanabe, E. V. Salgado, L. F. Encarnação, "Comparisons Between the p-q and p-q-r Theories in Three-Phase Four-Wire Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, paper accepted in October 6, 2008.
- [15] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung", ETZ-Arch. Elektrotech., vol. 53, pp. 596-599, 625-627, 700-702, 1932.
- [16] I. Van der Hoven, "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycles per Hour ", Journal of Meteorology, vol. 14, pp. 160-164, April 1957.