

# ساختار انتقال داده کاهش یافته در کنترل ثانویه توزیع شده یک ریزشبکه با استفاده از تبادل داده نامنظم

محی‌الدین گنجیان ابوخیلی، مجید شهابی و قباد شفییعی

$\delta e$ : مقدار بایاس ولتاژ در کنترل اکتی ولتاژی  
 $\delta n$ : سیگنال تغییرات شیب کنترل اکتی ولتاژی  
 $L$ : ماتریس لاپلاسین  
 $L_f, L_c$ : مقادیر اندوکتانس فیلتر خروجی اینورتر  
 $C_f$ : خازن فیلتر خروجی اینورتر  
 $Z_{\gamma}$ : امپدانس خط بین شین ۱ و ۲  
 $Z_{\beta}$ : امپدانس خط بین شین ۲ و ۳  
 $Q$ : توان راکتیو نرمال شده هر اینورتر  
 $a_{ij}$ : المان  $i, j$  در ماتریس مجاورت شبکه ارتباطی  
 $x_i(t)$ : سیگنال مبادله شده هر عامل  
 $\lambda(L)$ : مقادیر ویژه ماتریس لاپلاسین  
 $G_i(s)$ : تابع تبدیل رگولاتور جبرانگر فرکانسی  
 $G_r(s)$ : تابع تبدیل رگولاتور جبرانگر ولتاژی  
 $G_f(s)$ : تابع تبدیل رگولاتور جبرانگر تسهیم توان راکتیو  
 $\Delta_i$ : مقدار آستانه خطا در پروتکل انتقال داده نامنظم برای هر عامل  
 $e_i(t)$ : مقدار خطا برای هر عامل در زمان  $t$   
 $z_i(t)$ : متغیر تغییر یافته سیگنال ارسالی  
 $\sigma_i$ : ثابت عددی در پروتکل انتقال داده وابسته به شرایط  
 $N$ : تعداد عامل‌ها  
 $c_1, c_2$ : ثوابت عددی در پروتکل ارتباطی نامنظم مستقل از شرایط  
 $Z_{\gamma}$ : امپدانس خط بین شین ۳ و ۴  
 $Z_{L1}$ : امپدانس بار شماره ۱  
 $Z_{L2}$ : امپدانس بار شماره ۲  
 $Z_{L3}$ : امپدانس بار شماره ۳

## ۱- مقدمه

هر ریزشبکه از عناصر و تجهیزاتی همچون بار، منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر، کنترل کننده مرکزی، کلیدهای سرعت بالا، تجهیزات حفاظتی و سیستم‌های مخابراتی، کنترلی و اتوماسیون تشکیل می‌گردد [۱]. امروزه با توجه به افزایش استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، به کارگیری مبدل‌های الکترونیک قدرت بسیار رشد نموده و از این رو ریزشبکه‌های مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت روزبه‌روز در حال افزایش می‌باشند. یکی از ویژگی‌های منابع تولید پراکنده با واسط مبدل الکترونیک قدرتی، توانایی ذاتی با پاسخ دینامیکی سریع است. برخلاف منابع تولید پراکنده مرسوم، این منابع هیچ اینرسی را به ریزشبکه اضافه نکرده و هیچ تمایلی به تثبیت فرکانس ریزشبکه ندارند. با وجود این، کنترل کننده‌های سرعت بالای مبدل‌ها می‌توانند در تنظیم فرکانس همکاری داشته باشند. تنظیم ولتاژ و فرکانس، تقسیم بار بین منابع با هدف بازده و امنیت، کنترل توان اکتیو و راکتیو در شبکه، بهینه‌سازی، کیفیت توان، مدیریت توزیع شده و پایداری از اهداف متنوع در هر ریزشبکه‌ای می‌باشند [۲] تا

چکیده: استفاده از مشخصه شیب اکتی در سطح کنترل اولیه جهت کنترل منابع موجود در ریزشبکه، همواره با یک خطای ماندگار در ولتاژ و فرکانس و عدم تسهیم مناسب توان راکتیو همراه می‌باشد. به کارگیری کنترل ثانویه می‌تواند تا حد مطلوبی این عیوب را جبران نماید. کنترل ثانویه به روش توزیع شده در مقابل روش متمرکز، مزیت‌های مختلفی مانند افزایش قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و توسعه‌پذیری را به ارمغان می‌آورد. پیاده‌سازی کنترل ثانویه توزیع شده معمولاً مبتنی بر الگوریتم اجماعی است که شبکه مخابراتی نقش بسیار مهمی در آن ایفا می‌کند. شبکه مخابراتی معمولاً به صورت پیوسته و با نرخ ثابت تبادل داده مدل شده است. در این مقاله با توجه به ماهیت گسسته شبکه مخابراتی، مدل گسسته الگوریتم اجماعی و شبکه مخابراتی آن در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور کاهش میزان تبادل داده و آزادسازی ترافیک شبکه مخابراتی، دو نوع انتقال داده نامنظم وابسته به شرایط و مستقل از شرایط پیشنهاد شده است. در این روش فواصل زمانی بین انتقال داده‌ها یکسان نمی‌باشد. همچنین تأخیر زمانی در انتقال داده به عنوان یک اثر نامطلوب مورد بررسی قرار گرفته است. روش پیشنهادی بر روی یک ریزشبکه جزیره‌ای اعمال شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد مطلوب این روش را به خوبی نشان می‌دهد.

کلیدواژه: الگوریتم اجماعی، انتقال داده نامنظم، ریزشبکه، کنترل ثانویه توزیع شده.

## فهرست علائم

$w$ : سرعت زاویه‌ای اینورتر در کنترل شیب اکتی  
 $E$ : ولتاژ خروجی هر اینورتر  
 $w^*$ : سرعت زاویه‌ای مرجع  
 $E^*$ : ولتاژ مرجع  
 $m$ : مقدار شیب کنترل اکتی فرکانسی  
 $n$ : مقدار شیب کنترل اکتی ولتاژی  
 $P$ : توان اکتیو خروجی هر اینورتر  
 $Q$ : توان راکتیو خروجی هر اینورتر  
 $P^*$ : توان اکتیو مرجع اینورتر  
 $Q^*$ : توان راکتیو مرجع اینورتر  
 $\delta w$ : مقدار بایاس فرکانس در کنترل اکتی فرکانسی

این مقاله در تاریخ ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۱۲ مرداد ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

محی‌الدین گنجیان ابوخیلی، آزمایشگاه پژوهشی مهندسی سیستم‌های قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، (email: m.ganjan@stu.nit.ac.ir)

مجید شهابی، (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، (email: shahabi.m@nit.ac.ir)

قباد شفییعی، گروه مهندسی برق، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، (email: q.shafiee@uok.ac.ir)

ارتباط داده بین لایه اول با لایه ثانویه نیز به شبکه مخابراتی یا انتقال داده نیاز بوده که این حجم از اطلاعات باید به یک مرکز ارسال و یا از آن به کنترل کننده‌های پایین دست ارسال شود. از طرفی در صورت از دسترس خارج شدن واحد کنترل مرکزی، عملکرد کل ریزشبکه مختل می‌شود. همچنین با افزایش تعداد منابع و کنترل کننده‌ها، نیاز به شبکه انتقال داده با حجم زیاد بوده که منجر به افزایش پیچیدگی کل سیستم به صورت تصاعدی می‌شود و عملکرد و استحکام آن را تهدید می‌نماید. به منظور رفع این مشکل از کنترل ثانویه توزیع شده<sup>۴</sup> استفاده شده است.

در روش کنترل ثانویه توزیع شده، کنترل کننده‌ها در سطح ریزشبکه توزیع شده و هر منبع با منابع مجاور خود اطلاعات مورد نیاز را مبادله می‌نماید. این استراتژی، نه تنها حجم پیچیدگی و ابعاد شبکه ارتباطی بین لایه‌ها را کاهش می‌دهد بلکه با بروز خطا و خرابی در یک کنترل کننده، مابقی شبکه می‌تواند با جداسازی واحد معیوب به کار خود ادامه دهد [۱۵]. پیاده‌سازی کنترل توزیع شده با به کارگیری سیستم‌های چندعاملی قابل اجرا می‌باشد. هر عامل، توانایی دریافت و ارسال داده و توانایی تصمیم‌گیری و تعامل با عامل‌های موجود در سیستم را داراست. در رفتار تعاملی در مقابل رفتار رقابتی، عامل‌ها به سمت یک هدف مشترک متمایل می‌شوند. پیاده‌سازی کنترل توزیع شده در سیستم چندعاملی به دو دسته الف) رفتار تعاملی پیشرو- پیرو و ب) رفتار تعاملی اجماعی (بدون رهبر) تقسیم می‌شود. کاربرد رفتار تعاملی پیشرو- پیرو در [۹] و [۱۲] بر روی یک ریزشبکه ارائه شده است.

پیاده‌سازی کنترل ثانویه با استفاده از پروتکل ارتباطی الگوریتم اجماعی<sup>۵</sup> در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [۱۶] تا [۱۸]. در این مراجع، انتقال اطلاعات به صورت پیوسته بین عامل‌ها (منابع تولیدی) انجام گرفته است. هدف کلی در کنترل توزیع شده چندعاملی اجماعی آن است که عامل‌های موجود در سیستم مورد نظر بر روی یک کمیت دلخواه از طریق تبادل اطلاعات با عوامل همسایه از طریق شبکه مخابراتی به اجماع برسند و از این رو عملکرد مستحکم‌تر و عملیاتی‌تری نسبت به خرابی لینک مخابراتی خواهند داشت. در کاربرد ریزشبکه، اطلاعات مابین منابع تولیدی مبادله می‌شود که از تئوری گراف جهت پیاده‌سازی آن استفاده می‌گردد. در [۱۶] از الگوریتم اجماع در قالب کنترل توزیع شده با دو سطح کنترلی اولیه و ثانویه جهت بهبود کیفیت توان (جبران‌سازی نامتعادلی ولتاژ) استفاده شده است. در [۱۷] از ساختار کنترل ثانویه توزیع شده مبتنی بر الگوریتم اجماع به صورت تیم‌گرا<sup>۶</sup> پیشنهاد شده است. همچنین رگولاتور ولتاژ و توان راکتیو تعبیه شده است. رگولاتور ولتاژ، متوسط ولتاژ در سراسر ریزشبکه را در حد استاندارد نگه می‌دارد. رگولاتور توان راکتیو به طور دینامیک ضرایب شیب افقی ولتاژ- توان راکتیو را تنظیم می‌کند. در [۱۸] یک ساختار کنترلی در دو سطح اولیه و ثانویه به صورت توزیع شده جهت تسهیم دقیق توان راکتیو و تثبیت ولتاژ متوسط در حد استاندارد استفاده شده است. رگولاتور ولتاژ به کار رفته بر اساس پروتکل ارتباطی الگوریتم اجماعی پویا می‌باشد. در [۱۹] از کنترل ثانویه توزیع شده جهت بهبود تسهیم توان راکتیو استفاده شده که خروجی کنترل ثانویه وارد امپدانس مجازی شده و با تغییر آن مرجع ولتاژ در حلقه داخلی کنترل ولتاژ را تغییر می‌دهد.

در اکثر مقالات مرتبط با کنترل ثانویه توزیع شده، پروتکل ارتباطی به

[۵]. مفهوم کنترل سلسله‌مراتبی به منظور پیاده‌سازی و اجرای تمامی این اهداف ارائه شده است [۶]. ساختار کنترلی سلسله‌مراتبی با کاربرد ریزشبکه در قالب سه لایه کنترلی متفاوت بوده که در هر لایه با توجه به خواسته الزامات عملکردی مورد نظر ریزشبکه و بازه زمانی مورد نیاز جهت پاسخ‌دهی کنترل کننده‌ها، هدف یا اهداف مورد نظر محقق می‌گردد.

تنظیم ولتاژ و فرکانس و بازیابی آنها با دقت و سرعت کافی در بازه زمانی مطلوب به صورت بهره‌برداری ایمن و قابل اطمینان ریزشبکه در سطح اولیه و ثانویه قابل اجرا است. مدیریت انرژی، برنامه‌ریزی تولید و مصرف، ملاحظات بازار و ... در لایه کنترلی بالاتر یا همان سطح ثالثیه انجام‌پذیر است.

منابع می‌توانند در دو مُد کنترل جریان (پیروی از شبکه) و کنترل ولتاژ (شکل‌دهی شبکه) به شین محلی خود متصل شوند [۷]. در مد کنترل جریان، تزریق توان به ریزشبکه بدون هیچ مشارکتی در تنظیم ولتاژ و فرکانس اجرا می‌شود. مد کنترلی بعدی، مد کنترل ولتاژ است که کنترل ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه جزیره‌ای را فراهم می‌آورد.

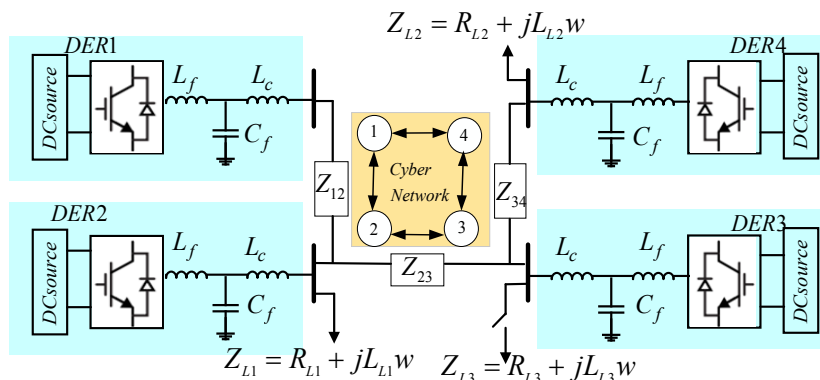
تنظیم ولتاژ و فرکانس و تسهیم توان اکتیو و راکتیو بین منابع ترجیحاً بدون لینک ارتباطی با به کارگیری روش کنترل مشخصه افقی<sup>۱</sup> قابل اجرا است که به طور گسترده‌ای در ساختار شکل‌دهی شبکه و حتی پیرو شبکه مورد توجه قرار گرفته و ساختارهای متفاوتی از آن در مقالات بسیاری پیشنهاد شده است [۸] و [۹]. در روش کنترل شیب افقی، دامنه ولتاژ و فرکانس تحت تأثیر مستقیم توان اکتیو و راکتیو بوده و از این رو به منظور رسیدن به یک تقسیم توان مناسب، دامنه و فرکانس در حلقه کنترلی باید به طور دقیق تنظیم شوند. هرچند با افزایش شیب کنترل مشخصه افقی، تسهیم توان بین منابع با کارکرد موازی بهبود می‌یابد اما تنظیم ولتاژ و فرکانس به طور مناسبی انجام نگرفته و با خطای حالت ماندگار بزرگ‌تری همراه خواهند بود. از این رو باید بین تسهیم توان و تنظیم ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه مصالحه‌ای انجام گیرد. در کنترل مشخصه افقی، تسهیم توان و تنظیم ولتاژ و فرکانس بر اساس سیگنال‌های فرکانس و ولتاژ بوده و در نتیجه تسهیم توان و کارکرد موازی منابع بدون نیاز به لینک مخابراتی جهت تبادل داده بین منابع یا بین منابع با واحد کنترل مرکزی<sup>۲</sup> (MGCC) پیاده‌سازی می‌گردد که در اصطلاح به این حالت کنترل غیر متمرکز<sup>۳</sup> اطلاق می‌گردد [۱۰]. خطای حالت ماندگار در ولتاژ و فرکانس در سراسر ریزشبکه، عدم تسهیم دقیق توان اکتیو و راکتیو و عدم عملکرد مناسب در شبکه با نسبت امپدانس مختلف از عیوب اساسی کنترل مشخصه افقی می‌باشند [۱۱].

جهت بهبود عملکرد کنترل شیب افقی و رفع اشکالات مطرح شده، از کنترل سطح بالاتر ثانویه جهت تنظیم مناسب نقاط تنظیم مراجع ولتاژ و فرکانس با هدف جبران‌سازی خطای ماندگار بهره گرفته شده که معمولاً به صورت متمرکز پیاده‌سازی می‌گردد. کنترل ثانویه با اندازه‌گیری پارامترهایی همچون فرکانس، دامنه ولتاژ و ...، سیگنال مناسبی را تولید و ارسال نموده تا خطای ماندگار جبران گردد. در حقیقت وظیفه اصلی کنترل ثانویه بازیابی فرکانسی و ولتاژی در ریزشبکه می‌باشد [۱۲] و [۱۳].

استراتژی کنترل متمرکز در واحد کنترل مرکزی ریزشبکه پیاده‌سازی شده و تمامی دستورات در قالب سیگنال‌های مرجع مختلف ولتاژی، فرکانسی و توان به کنترل کننده‌های محلی ارسال می‌شود [۱۴]. جهت

4. Distributed Secondary Control  
5. Consensus Algorithm  
6. Team Oriented

1. Droop Control  
2. Micro-Grid Central Control  
3. Decentralized Control



شکل ۱: ساختار فیزیکی ریزشبکه به همراه شبکه مخابراتی.

ریزشبکه شعاعی مورد مطالعه قابلیت تأمین بار پیک را داشته و نیاز به قطع بار در شرایط پرباری نمی‌باشد.

به منظور تنظیم ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه و تسهیم توان بین منابع با عملکرد موازی از کنترل مشخصه افتی استفاده شده که در رابطه زیر بیان گردیده است

$$\begin{aligned} w &= w^* - m(P - P^*) \\ E &= E^* - n(Q - Q^*) \end{aligned} \quad (۱)$$

ساختار کنترلی در سه حلقه متوالی کنترل جریان، کنترل ولتاژ و کنترل توان وجود دارد. همان طور که ذکر شد جهت جبران خطای ماندگار ناشی از عملکرد کنترل مشخصه افتی و به منظور بهبود تنظیم ولتاژ و فرکانس و تسهیم توان و به خصوص توان راکتیو، از کنترل ثانویه استفاده شده است. در این سطح سه کنترل کننده مجزا تعبیه شده که عبارتند از:

- جبرانگر خطای فرکانس
- جبرانگر خطای دامنه ولتاژ
- جبرانگر تسهیم توان راکتیو

قابل توجه است که جبرانگر ولتاژ و تسهیم کننده توان راکتیو تأثیر متقابل بر هم دارند و باید به درستی طراحی و پیاده‌سازی گردند. خروجی این دو تنظیم کننده بر روی کنترل مشخصه افتی ولتاژی در سطح اولیه اعمال می‌شوند و سبب تغییر در میزان بایاس یا شیب مشخصه افتی می‌شوند. در طراحی جبرانگرها در سطح ثانویه، شبکه سایبری نقش بسیار مهمی ایفا می‌نماید.

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، شبکه سایبری برای ریزشبکه مورد مطالعه دارای چهار گره یا عامل<sup>۴</sup> ارتباطی متناظر با چهار منبع تولید پراکنده است که هر عامل با عامل مجاور خود به تبادل داده می‌پردازد. داده مبادله شده عبارت است از توان راکتیو نرمال شده منابع که این داده‌ها پس از انتقال با یک نرخ مشخص، وارد الگوریتم اجماعی می‌شوند و خروجی آن نیز به کنترل اولیه اعمال می‌گردد. عملکرد جبرانگر توان راکتیو رابطه مستقیمی با عملکرد الگوریتم اجماعی دارد و با تنظیم پارامترهای آن می‌توان به نتیجه مطلوب دست یافت. عملکرد الگوریتم اجماعی خود به توپولوژی انتقال داده و ضرایب موجود در الگوریتم بستگی دارد. معادلات مربوط به سه رگولاتور به صورت (۲) تا (۶) می‌باشد [۱۸]. روابط (۲) و (۴) به ترتیب مربوط به کنترل مشخصه افتی مرسوم فرکانس و ولتاژ است که یک مقدار بایاس  $\delta\omega$  و  $\delta e$  به منظور جبران سازی خطای ماندگار به آنها اضافه شده است. مقادیر بایاس فرکانسی و ولتاژی مطابق (۳) و (۵) به دست می‌آیند که مبتنی بر

صورت پیوسته مدل شده است در صورتی که پروتکل ارتباطی ذاتاً گسسته بوده و نیاز است تا روابط حاکم بر الگوریتم اجماعی در کنترل ثانویه توزیع شده به صورت گسسته بیان و پیاده‌سازی گردد. هرچند به کارگیری کنترل ثانویه توزیع شده در بازیابی ولتاژ و فرکانس و تسهیم توان راکتیو عملکرد مناسبی فراهم می‌آورد و تا حد امکان تبادل داده نسبت به روش متمرکز کاهش یافته است، تبادل داده بین منابع در مجاورت هم به طور دایم و با نرخ انتقال مشخص انجام می‌پذیرد که می‌تواند به افزایش حجم محاسبات و اشغال شدن حافظه کامپیوتر مرکزی منجر شود. از این رو سعی بر آن است تا انتقال داده‌ها در زمان مشخص یا در شرایط مشخصی انجام گیرد که استفاده از پروتکل‌های ارتباطی نامنظم<sup>۱</sup> راه حلی موثر می‌باشد [۲۰].

در این مقاله ساختار کنترلی به منظور تسهیم دقیق توان راکتیو و بازیابی ولتاژ و فرکانس در سراسر ریزشبکه با به کارگیری کنترل اولیه و ثانویه توزیع شده با استفاده از پروتکل‌های ارتباطی نامنظم در فضای گسسته پیشنهاد شده است. نوآوری‌های پژوهش حاضر به شرح زیر است:

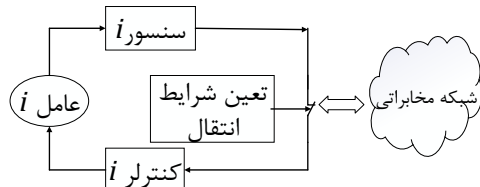
- (الف) مدل سازی و پیاده‌سازی پروتکل ارتباطی در فضای گسسته به منظور تسهیم توان راکتیو در سطح کنترل ثانویه.
- (ب) به کارگیری پروتکل ارتباطی انتقال داده نامنظم در قالب دو روش وابسته به شرایط یا فعال شونده با شرایط<sup>۲</sup> و مستقل از شرایط<sup>۳</sup>.
- (ج) بررسی اثر تأخیر زمانی در انتقال داده بر روی عملکرد سیستم کنترلی.

در ادامه و در بخش دوم، ساختار ریزشبکه مورد مطالعه قرار گرفته و چارچوب کنترلی آن توضیح داده خواهد شد. معادلات حاکم بر الگوریتم اجماعی در فضای پیوسته و گسسته در بخش سوم ارائه می‌شود. در بخش چهارم، دو پروتکل ارتباط داده و شرایط تحقق آنها ارائه شده و نتایج پیاده‌سازی این پروتکل‌های ارتباطی در بخش پنجم آورده شده است.

## ۲- ریزشبکه و ساختار کنترلی

ریزشبکه مورد مطالعه که در شکل ۱ نشان داده شده از چهار منبع تشکیل گردیده است. منابع مذکور مجهز به واسط الکترونیک قدرت (اینورتر) می‌باشند. با توجه به طولانی بودن دوره زمانی مورد مطالعه به نسبت تغییر در رفتار خروجی محرک اولیه منابع، از رفتار دینامیک محرک اولیه منابع صرف نظر شده است. هر منبع از طریق فیلتر LC و امپدانس اتصال که از نوع سلفی است به شین محلی خود متصل شده است.

1. Aperiodic Communication
2. Event-Trigger
3. Independent State



شکل ۳: ساختار کلی یک عامل با سیستم تبادل داده نامنظم.

یک ماتریس قطری  $D$  با تعریف  $D_i = \text{diag}\{\sum_j a_{ij}\}$  که درایه‌های هر قطر آن برابر با جمع جبری درایه‌های ماتریس مجاورت همان سطر است.

الگوریتم اجماعی به فرم پیوسته به صورت زیر می‌باشد

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) \quad (7)$$

رابطه فوق به فرم ماتریسی نمایش داده شده است

$$\dot{x}_i(t) = -Lx \quad (8)$$

با توجه به ماهیت گسسته شبکه مخابراتی از یک سو و طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها به صورت گسسته و دیجیتال، لازم است تا معادلات فوق در فضای گسسته بیان گردد. در [۲۱] با به کارگیری ماتریس گذار<sup>۱</sup> متناظر با گراف شبکه مخابراتی، فرم گسسته الگوریتم اجماعی در یک ریزشبه DC ارائه شده است. در مقاله حاضر با به کارگیری ماتریس پرون<sup>۲</sup> متناظر با گراف شبکه مخابراتی طبق (۹)، فرم گسسته استخراج گردید که به منظور اعمال بر روی ریزشبه AC استفاده شده است. بلوک دیاگرام این روش در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه‌های انتقالی از عامل‌های مجاور به همراه مقدار حال حاضر عامل وارد الگوریتم شده و نمونه بعدی را تولید می‌نمایند

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j(k) - x_i(k)) \quad (9)$$

در (۹)،  $\varepsilon$  یک پارامتر کنترلی مثبت بوده که با (۱۰) بیان می‌گردد [۲۲]

$$0 < \varepsilon \leq \frac{2}{\lambda_1(L) + \lambda_{N-1}(L)} \quad (10)$$

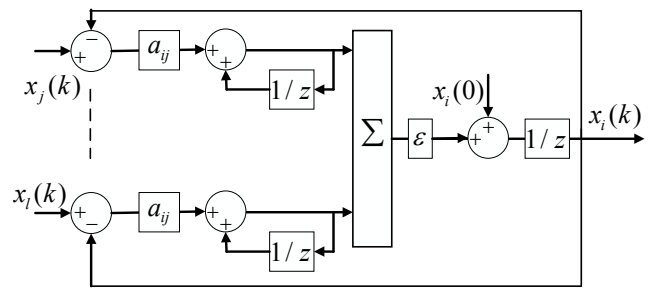
$\lambda_i$  مقادیر ویژه ماتریس لاپلاسیان می‌باشد

$$0 = \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_{N-1} \leq \lambda_N \leq 2\Delta \quad (11)$$

در این روش به علت وجود پارامتر کنترلی  $\varepsilon$ ، سیستم دارای یک درجه آزادی جهت تنظیم نوع پاسخ الگوریتم اجماعی خواهد بود.

بلوک دیاگرام ساختار کنترلی در سطح اولیه و ثانویه به همراه شبکه مخابراتی در شکل ۳ به نمایش درآمده و در سطح اولیه معادلات مشخصه افتی حاکم است. در سطح ثانویه سه جبرانگر تعبیه شده که معادلات آنها در (۲) تا (۶) آورده شده است. سه کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی  $G_i(s)$ ،  $G_r(s)$  و  $G_f(s)$  به منظور تولید سیگنال‌های مناسب کنترلی در جهت از بین بردن خطای ماندگار در ولتاژ، فرکانس و اختلاف توان راکتیو تولیدی منابع استفاده شده است.

همان طور که اشاره شد شبکه مخابراتی وظیفه ایجاد یک بستر برای انتقال داده را دارد. داده‌ها معمولاً با یک نرخ ثابت بین عامل‌ها مبادله می‌شوند. هرچه تعداد و نرخ انتقال داده زیاد شود، نیاز به شبکه مخابراتی با پهنای باند بزرگ‌تر است که با توسعه ابعاد ریزشبه، این نیاز بیشتر شده



شکل ۴: بلوک دیاگرام مدل گسسته الگوریتم اجماعی.

کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی می‌باشند. همچنین جهت بهبود تسهیم توان راکتیو بین منابع، یک رگولاتور مطابق (۶) استفاده شده است به نحوی که با تغییر میزان شیب افتی ولتاژی، توان راکتیو بین منابع متناسب با ظرفیت بین منابع تسهیم گردد

$$\omega = \omega^* - m(P - P^*) + \delta\omega \quad (2)$$

$$\delta\omega = k_{po}(\omega - \omega^*) + k_{io} \int (\omega - \omega^*) dt \quad (3)$$

$$E = E^* - (n - \delta n)(Q - Q^*) + \delta e \quad (4)$$

$$\delta e = k_{pe}(E - E^*) + k_{ie} \int (E - E^*) dt \quad (5)$$

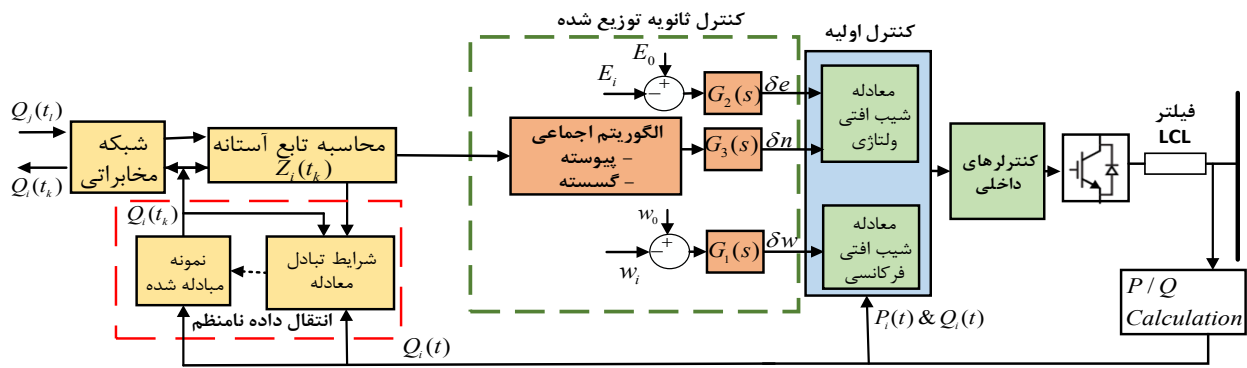
$$\delta n = k_{pQ}(-L\bar{Q}) + k_{iQ} \int (-L\bar{Q}) dt \quad (6)$$

### ۳- مدل گسسته الگوریتم اجماعی

در پیاده‌سازی کنترل ثانویه به روش توزیع‌شده، شبکه سایبری بسیار تأثیرگذار می‌باشد. داده‌های مورد نظر با یک نرخ مشخص بین گره‌ها (عامل‌ها) مبادله می‌شوند و از این رو می‌توان دریافت که ماهیت شبکه سایبری گسسته بوده و نرخ تبادل داده در حدود چند صد میلی‌ثانیه تا ثانیه است. پروتکل ارتباطی به کار رفته در این مقاله بر اساس الگوریتم اجماعی است که تمامی عامل‌ها در یک مقدار مشخصی به توافق رسیده و به آن همگرا می‌شوند. شایان ذکر است این مقدار مورد توافق بر خلاف الگوریتم راهبر-پیرو از قبل تعریف شده نمی‌باشد. اگر شبکه سایبری به درستی طراحی و پیاده‌سازی شود، همگرایی به یک توافق فراگیر قابل دسترس می‌باشد.

شبکه سایبری می‌تواند توپولوژی‌های متفاوتی داشته باشد که یک نمونه از آن به صورت حلقوی در شکل ۱ آمده است. هر شبکه سایبری را می‌توان با استفاده از تئوری گراف به صورت یک گراف توصیف نمود. هر شبکه سایبری مجموعه‌ای از رئوس  $V_{cyber} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  و یال‌های  $E_{cyber} = V_{cyber} \times V_{cyber}$  می‌باشد که هر یال دو رأس را به هم متصل می‌نماید. این مجموعه را می‌توان به صورت فرم ماتریسی بیان نمود که ماتریس مجاورت  $A_{cyber}$  نام دارد. ماتریس مجاورت یک ماتریس مربعی با ابعاد  $N \times N$  می‌باشد که درایه‌های آن به صورت  $a_{ij}$  تعریف می‌شود. اگر بین رأس  $i$  و  $j$  یک یال وجود داشته باشد مقدار درایه متناظر در ماتریس مجاورت بزرگ‌تر از صفر و در غیر این صورت برابر با صفر است. با توجه به دوجهته بودن یال بین دو رأس، ماتریس مجاورت متقارن بوده و تبادل داده به صورت رفت و برگشت می‌باشد. هرچند تبادل داده می‌تواند به صورت تک‌جهته باشد و هر رأس به رأس متصل خود داده را ارسال یا دریافت نماید. گام بعد در مدل‌سازی شبکه سایبری، تعریف ماتریس لاپلاسیان است که مقادیر ویژه شبکه سایبری قابل محاسبه خواهد بود. ماتریس لاپلاسیان به صورت  $L = D - A_{cyber}$  بیان می‌شود که ماتریس

1. Transition Matrix  
2. Perrone Matrix



شکل ۴: ساختار کنترل اولیه و ثانویه توزیع شده برای یک منبع به همراه انتقال داده نامنظم پیشنهادی.

زمانی که مقدار آستانه نرسیده باشد، ارسال سیگنال متوقف است و وقتی که خطا بیشتر از آستانه گردید، ارسال سیگنال شروع شده و در شبکه سایبری به عامل‌های مجاور ارسال خواهد شد. مقدار آستانه می‌تواند به صورت آستانه ثابت (مستقل از شرایط) و یا متغیر (وابسته به شرایط) باشد. در آستانه ثابت معمولاً یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. در آستانه متغیر، مقدار آستانه به شرایط حاکم بر سیستم و اطلاعات مبادله شده بستگی دارد. فرم کلی الگوریتم اجماعی با روش تبادل داده نامنظم در (۱۲) نشان داده شده است

$$\begin{cases} Protocol : x_i(t) = -\varepsilon \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t_k^i) - x_j(t_k^j)) \\ ETC : f_i(e_i(t)) \leq \Delta_i(z_i(t)) \end{cases} \quad (12)$$

که در آن  $f_i(e_i(t))$  خطای مبادله شده برای هر عامل،  $\Delta_i$  تابع آستانه و  $Z_i(t) = x_i(t_k^i) - x_j(t_k^j)$  می‌باشد. همچنین  $N$  تعداد عامل‌هایی است که با عامل  $i$  به تبادل داده می‌پردازند. تابع خطا به صورت می‌باشد (۱۳)

$$e_i(t) = x_i(t_k^i) - x_i(t) \quad , \quad t \in [t_k^i, t_{k+1}^i) \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه (۱۳) که اختلاف بین نمونه واقعی حال حاضر با نمونه ارسالی در زمان  $t_k^i$  است در (۱۲)، رابطه زیر حاصل شده است

$$\dot{x}_i(t) = -\sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) - \sum_{j \in N_i} (e_i(t) - e_j(t)) \quad (14)$$

که فرم ماتریسی آن به صورت (۱۵) است

$$\dot{x}_i(t) = -L(x(t) + e(t)) \quad (15)$$

جهت تعیین شرط آستانه از روش لیاپانوف استفاده می‌گردد. بدین معنی که شرایط آستانه باید طوری تعیین گردد که پایداری سیستم را تهدید نکند. در روش پایداری لیاپانوف باید یک تابع انرژی یافت که مقدار آن مثبت و مشتق آن منفی معین باشد. تابع لیاپانوف و مشتق آن به صورت (۱۶) تا (۱۸) بیان می‌گردند

$$V = \frac{1}{2} x^T Lx \quad (16)$$

$$\dot{V} = x^T L \dot{x} = -x^T L(Lx + Le) = -Z^T Z - Z^T Le \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\sum_i Z_i^T - \sum_i \sum_{j \in N_i} Z_i(e_i - e_j) = \\ &= -\sum_i Z_i^T - \sum_i |N| Z_i e_i + \sum_i \sum_{j \in N_i} Z_i e_j \end{aligned} \quad (18)$$

با استفاده از نامساوی (۱۹) و به ازای مقادیر مثبت  $a$ ، مشتق تابع لیاپانوف محدود شده که با (۲۰) نشان داده می‌شود

و در نتیجه فراهم آوردن این بستر مخابراتی هزینه بر خواهد بود. از این رو یکی از روش‌ها جهت کاهش میزان تبادل داده بین عامل‌ها و آزادسازی بارگذاری شبکه سایبری و کاهش تخصیص حافظه مورد نیاز آن، استفاده از همان نمونه قبلی است تا زمانی که عملکرد سیستم را مختل ننماید و در غیر این صورت نمونه جدید مبادله شود. با کاهش میزان بارگذاری و ترافیک شبکه سایبری، می‌توان از این شرایط مطلوب در برنامه‌های دیگر استفاده نمود. برخلاف روش انتقال داده دائمی، فاصله زمانی بین انتقال داده‌ها می‌تواند نامنظم باشد و به گونه‌ای طراحی گردد تا هم عملکرد سیستم را تضعیف نکند و هم از بارگذاری شبکه مخابراتی بکاهد.

#### ۴- پروتکل‌های ارتباطی نامنظم

در این مقاله فاصله زمانی بین انتقال داده‌ها یکسان در نظر گرفته نشده است. فاصله زمانی بین انتقال داده‌ها به صورت غیر یکسان و نامنظم پیشنهاد شده است. مطابق با شکل ۳ رویکرد پیشنهادی جهت تعیین زمان انتقال نمونه مبتنی بر دو تابع است که عبارتند از:  
الف) مقدار خطای به دست آمده بین مقدار واقعی و حال حاضر نمونه کمیت مبادله شده با مقدار نمونه مبادله شده همان کمیت.  
ب) مقدار بیشینه خطای قابل قبول به نحوی که پایداری سیستم را تهدید ننماید.

مقدار بیشینه خطا به صورت یک آستانه تعریف شده است. این آستانه می‌تواند با در نظر گرفتن دینامیک و شرایط سیستم باشد که در این صورت روش انتقال داده نامنظم وابسته به شرایط اطلاق می‌شود یا بدون لحاظ نمودن شرایط سیستم که به انتقال داده نامنظم مستقل از شرایط بیان می‌گردد. در این مقاله هر دو رویکرد به منظور اعمال بر روی کنترل ثانویه توزیع شده در یک ریزشکه پیشنهاد شده و اجرا می‌گردد. شایان ذکر است که معیار طراحی این دو روش به گونه‌ای است که پایداری سیستم را مختل نکند.

ساختار مفهومی انتقال داده نامنظم برای یک عامل در شکل ۴ به نمایش درآمده است. سنسور برای اندازه‌گیری کمیت‌های خروجی و کنترل کننده جهت کنترل به عنوان اساس یک عامل می‌باشند. در انتقال داده نامنظم، یک بلوک بین سنسور و کنترل کننده تعبیه و نصب شده است. این بلوک که هسته اصلی انتقال داده نامنظم است و وظیفه دارد تا زمان انتقال نمونه را تعیین نماید تا کنترل کننده خود عامل و مابقی کنترل کننده‌ها به روز رسانی شوند.

#### ۴-۱ روش وابسته به شرایط

در این روش تا زمانی که خطای بین دو نمونه متوالی از یک مقدار آستانه‌ای تجاوز نکند، مقدار نمونه قبلی در محاسبات استفاده می‌شود. تا

که در آن  $c_1 \geq 0$ ،  $c_2 \geq 0$ ،  $c_3 + c_4 > 0$  و  $\alpha > 0$  می‌باشد.

بر خلاف روش قبلی که وابسته به شرایط بود، این روش دارای فرم ساده‌تری است به نحوی که انتقال داده به عامل‌های مجاور بر اساس شرایط خود عامل بستگی دارد. همچنین حداقل زمان بین دو انتقال داده با تنظیم پارامترهای فوق قابل دستیابی است. همان طور که هدف در روش انتقال داده نامنظم انتقال داده به صورت غیر دوره‌ای در فاصله زمانی‌های غیر یکسان می‌باشد، ممکن است به دلیل طراحی و تنظیم نامناسب پروتکل ارتباطی، انتقال داده با فاصله زمانی کوتاه‌تر از روش منظم و دوره‌ای رخ دهد و در نتیجه نرخ انتقال داده به شدت افزایش یابد. به این پدیده رفتار زنون<sup>۱</sup> اطلاق می‌شود. برخلاف روش وابسته به شرایط، در این روش دینامیک سیستم در انتقال داده هیچ نقشی نداشته و همه عامل‌ها به جای همگرایی بر روی یک عدد، در یک باند مشخص همگرا خواهند شد.

## ۵- مطالعات عددی

به منظور ارزیابی کنترل ثانویه توزیع شده مبتنی بر الگوریتم اجماعی با به کارگیری پروتکل انتقال داده نامنظم، روش پیشنهادی بر روی ریزشبه نشان داده شده در شکل ۱ اعمال شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در ذیل آورده شده است. ولتاژ نامی ریزشبه ۳۲۵ ولت با فرکانس ۵۰ هرتز است. منابع از طریق اینورتر و فیلتر LCL به شین محلی خود متصل می‌باشند. کنترل‌کننده‌های منابع در سطح اولیه مبتنی بر کنترل مشخصه افقی می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده است.

شایان ذکر است ضرایب مشخصه افقی فرکانسی و ولتاژی برای اینورترهای ۳ و ۴، برابر اینورترهای ۱ و ۲ می‌باشد. همچنین مشخصات شبکه مخابراتی نیز مانند ماتریس مجاورت  $A$  و ماتریس لاپلاسین مطابق (۲۵) است. مقدار  $\varepsilon$  نیز برابر با ۰٫۲ در نظر گرفته شده است

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$L = D - A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

مقادیر ویژه ماتریس لاپلاسین نیز عبارتند از

$$\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 2, \lambda_3 = 2, \lambda_4 = 4 \quad (26)$$

## ۵-۱ انتقال داده منظم

در شروع عملکرد ریزشبه، تنها کنترل اولیه بر روی منابع فعال بوده و کنترل ثانویه در زمان  $t = 2/6$  ثانیه فعال شده است. فاصله زمانی انتقال داده در این روش ۲۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل ۵، فرکانس ریزشبه، ولتاژ شین‌ها و توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی منابع را نشان می‌دهد. جهت بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌ها، بار در شین ۳ در زمان  $t = 4/5$  s به ریزشبه افزوده شده و پس از یک ثانیه از ریزشبه جدا می‌گردد.

جدول ۱: پارامترهای الکتریکی و کنترلی.

ولتاژ ریزشبه	۳۲۵ V
فرکانس ریزشبه	۵۰ Hz
خازن فیلتر	۲۵ $\mu$ F
اندوکتانس‌های فیلتر	۱٫۸ mH
امپدانس خطوط ۱-۲	۰٫۸ $\Omega$ و ۳٫۶ mH
امپدانس خطوط ۲-۳	۰٫۴ $\Omega$ و ۱٫۸ mH
امپدانس خطوط ۳-۴	۰٫۷ $\Omega$ و ۲ mH
امپدانس بار شین ۱	۴۰ $\Omega$ و ۰٫۳ mH
امپدانس بار شین ۴	۱۲۰ $\Omega$ و ۰٫۱ mH
توان اینورترهای ۱ و ۲	۲ kW
توان اینورترهای ۳ و ۴	۱ kW
ضریب مشخصه افقی فرکانس اینورتر ۱ و ۲	$32 \times 10^{-5}$
ضریب مشخصه افقی ولتاژ	۰٫۰۳
ضرایب تناسبی-انتگرالی $G_i(s)$	۲۰ (۱/s) و ۰٫۰۲
ضرایب تناسبی-انتگرالی $G_i(s)$	۲ (۱/s) و ۰٫۰۵
ضرایب تناسبی-انتگرالی $G_i(s)$	۱۰ (۱/s) و ۰٫۰۲

$$|xy| \leq \frac{a}{2} x^2 + \frac{1}{2a} y^2, \quad a > 0. \quad (19)$$

$$\dot{V} \leq -\sum_i Z_i^* + \sum_i a |N| Z_i^* + \sum_i \frac{1}{2a} |N| e_i^* + \sum_i \sum_{j \in N_i} \frac{1}{2a} e_j^* \quad (20)$$

پس از انجام عملیات ساده‌سازی، (۲۱) حاصل می‌شود

$$\dot{V} \leq -\sum_i (1 - a|N|) Z_i^* + \sum_i \frac{1}{a} |N| e_i^* \quad (21)$$

به منظور پایداری سیستم، مشتق تابع لیاپانوف باید منفی شود که برای برقراری این شرط، لازم است تا شرط زیر محقق گردد

$$e_i^* \leq \frac{\sigma_i a (1 - aN)}{N} Z_i^* \quad (22)$$

که  $0 < a \leq 1/N$  و  $0 < \sigma < 1$  است. فرم گسسته (۲۲) به صورت رابطه زیر خواهد بود

$$e_i^*(t_k^i) \leq \frac{\sigma_i a (1 - aN)}{N} Z_i^*(t_k^i) \quad (23)$$

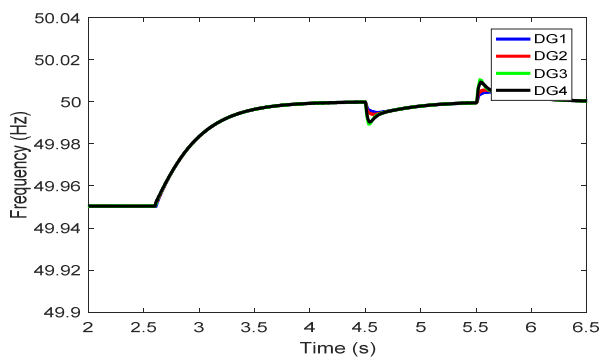
هرگاه خطای به دست آمده از (۱۳) از مقدار آستانه محاسبه شده طبق (۲۳) بزرگ‌تر شود، مکانیزم تبادل داده فعال شده و یک نمونه جدید ارسال می‌نماید.

## ۴-۲ روش مستقل از شرایط

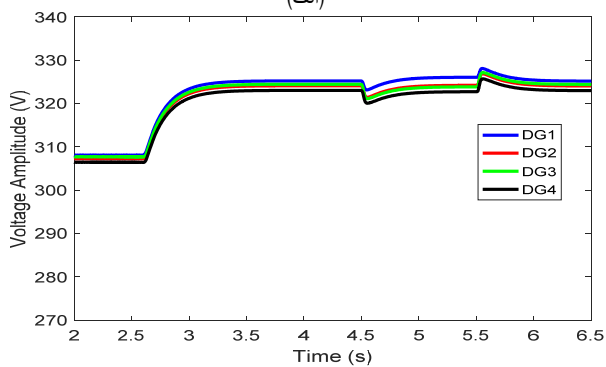
یکی از روش‌های مؤثر دیگر به منظور جلوگیری از ارسال منظم و دوره‌ای داده‌ها بین عامل‌ها و کاهش میزان انتقال داده، استفاده از پروتکل انتقال نامنظم داده مستقل از شرایط می‌باشد. در این پروتکل، لحظه ارسال داده مستقل از شرایط سیستم بوده و بر اساس آستانه‌گذاری ثابتی تعیین می‌گردد.

پروتکل ارتباطی مذکور را می‌توان به صورت (۲۴) نشان داد

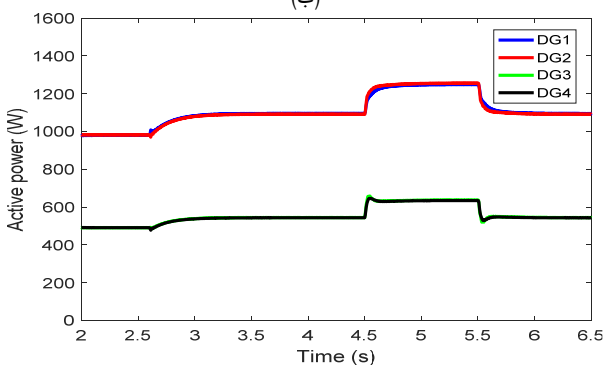
$$\begin{cases} \text{Protocol : } x_i(t) = -\varepsilon \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t_k^i) - x_j(t_k^j)) \\ \text{ETC : } f_i(e_i(t)) \leq \Delta_i(z_i(t)) = c_i + c_1 e^{-at} \end{cases} \quad (24)$$



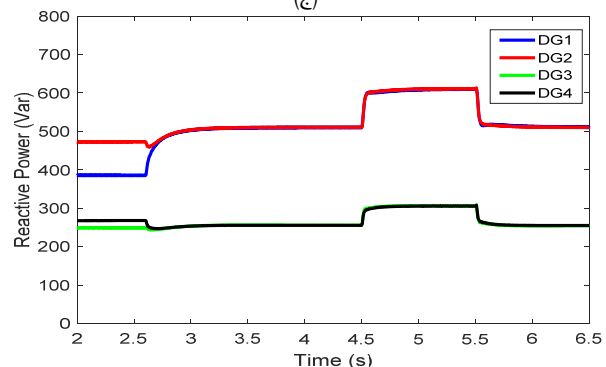
(الف)



(ب)



(ج)

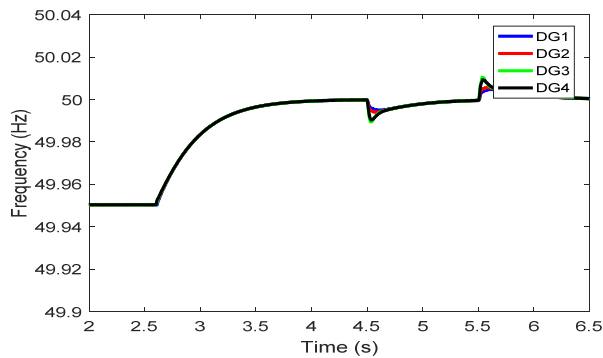


(د)

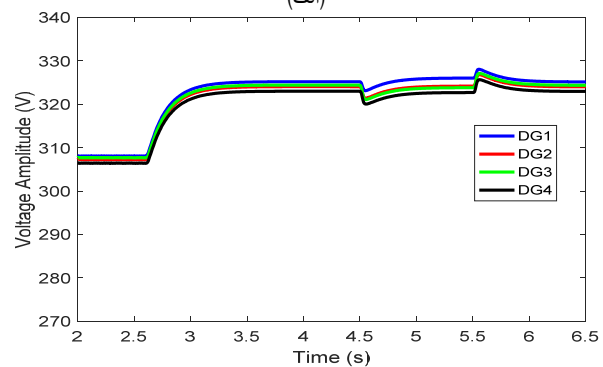
شکل ۵: عملکرد کنترل ثانویه توزیع شده با انتقال داده نامنظم وابسته به شرایط، شامل (الف) فرکانس ریز شبکه، (ب) توان اکتیو تولیدی منابع، (ج) ولتاژ شین ها و (د) توان راکتیو تولیدی منابع.

داده نامنظم وابسته به شرایط، شبیه سازی مشابه با بخش قبل انجام گرفته است که نتایج به دست آمده در شکل ۶ به نمایش درآمده است. پارامتر  $a = 0.2$  و  $\sigma = 0.55$  انتخاب شده است.

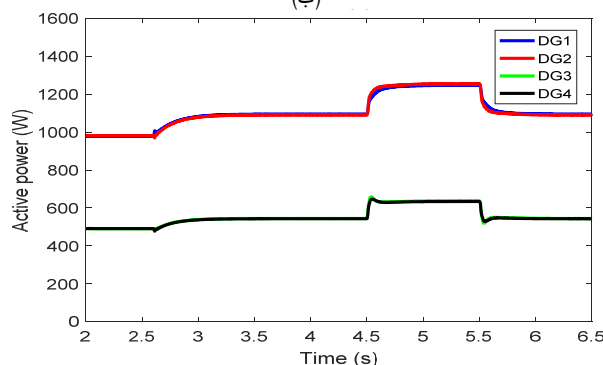
با توجه به شکل ۶ به راحتی می توان دریافت که نتایج خروجی از این روش با روش انتقال داده نامنظم تفاوت قابل توجهی نداشته و کنترل ثانویه عملکرد مطلوبی داشته است و انتقال داده به صورت نامنظم می تواند



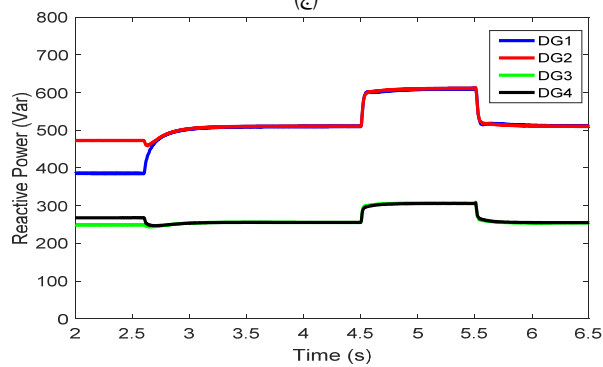
(الف)



(ب)



(ج)



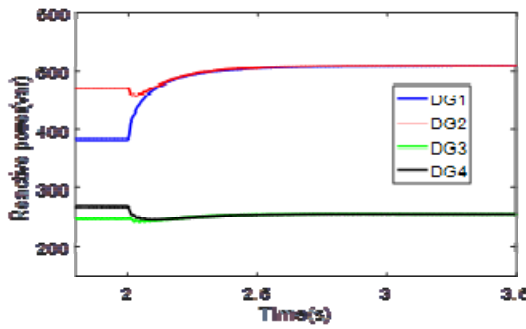
(د)

شکل ۵: عملکرد کنترل ثانویه توزیع شده با انتقال داده نامنظم، شامل (الف) فرکانس ریز شبکه، (ب) توان اکتیو تولیدی منابع، (ج) ولتاژ شین ها و (د) توان راکتیو تولیدی منابع.

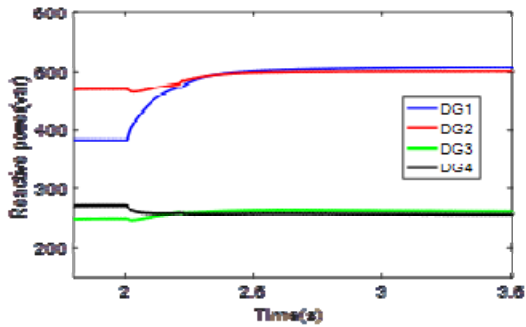
همان طور که از شکل ۵ مشخص است، تمامی متغیرها به درستی و بدون اغتشاش این تغییرات را دنبال نموده اند. با انتقال داده به روش نامنظم، توان راکتیو به طور مناسبی بین منابع تسهیم شده و هر منبع بر اساس ظرفیت خود توان راکتیو مشخصی را تولید می نماید.

### ۵-۲ انتقال داده نامنظم وابسته به شرایط

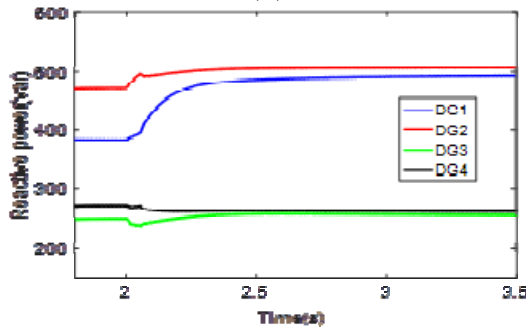
برای کنترل ثانویه مبتنی بر الگوریتم اجماعی با به کارگیری انتقال



(الف)



(ب)



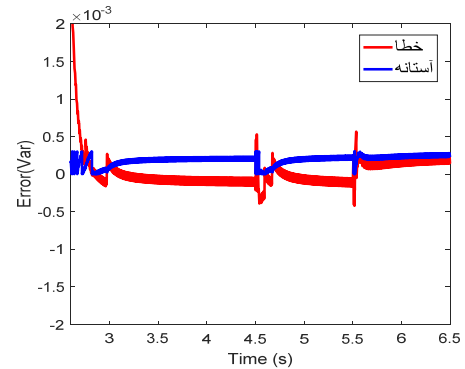
(ج)

شکل ۹: توان راکتیو منابع در کنترل ثانویه توزیع شده با انتقال داده نامنظم مستقل از شرایط با مقادیر مختلف  $c$ ، (الف)  $c = 0.0025$ ، (ب)  $c = 0.001$ ، (ج)  $c = 0.0025$ .

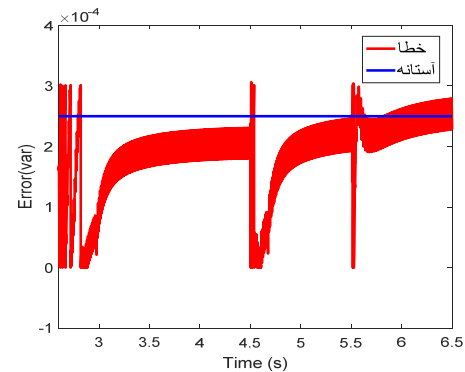
نکته حایز اهمیت در روش انتقال داده نامنظم مستقل از شرایط، انتخاب مقدار عددی آستانه ثابت می‌باشد که تأثیر مستقیمی بر روی عملکرد الگوریتم اجماعی و همگرایی آن دارد. در صورتی که مقدار  $c \neq 0$  انتخاب گردد، همگرایی الگوریتم اجماعی در یک باند مشخص محقق خواهد شد. به منظور بررسی بیشتر، مقادیر مختلفی برای  $c$  در نظر گرفته شده که نتایج خروجی آن در شکل ۹ نشان داده شده است. به راحتی می‌توان از شکل ۹ مشاهده نمود که با انتخاب مقادیر بزرگتر  $c$ ، باند همگرایی افزایش می‌یابد که با افزایش آن در حقیقت، تسهیم توان راکتیو به عنوان یکی از اهداف کنترل ثانویه با مشکل روبه‌رو خواهد شد.

#### ۴-۵ اثر تأخیر زمانی انتقال داده بر روی روش پیشنهادی

هر شبکه مخابراتی در حالت ایده‌آل باید داده مورد نظر را به طور کامل و دقیق و بدون تأخیر ارسال یا دریافت نماید، هرچند در حالت عملی چنین رفتاری غیر ممکن است. تأخیر زمانی در انتقال داده یکی از رفتارهای ذاتی هر شبکه مخابراتی می‌باشد که می‌تواند بر عملکرد کنترل‌کننده‌ها و کل سیستم تأثیرگذار باشد. از این رو به منظور بررسی بیشتر، مطالعه‌ای با حضور تأخیر زمانی انجام گرفته است. در تمامی مطالعات نرخ انتقال داده ۲۰ میلی‌ثانیه لحاظ شده و تأخیر زمانی مورد نظر در حدود ۱۰۰ میلی‌ثانیه



شکل ۷: نمودار تغییرات خطا و تابع آستانه برای اینورتر ۱ در روش انتقال داده نامنظم وابسته به شرایط.



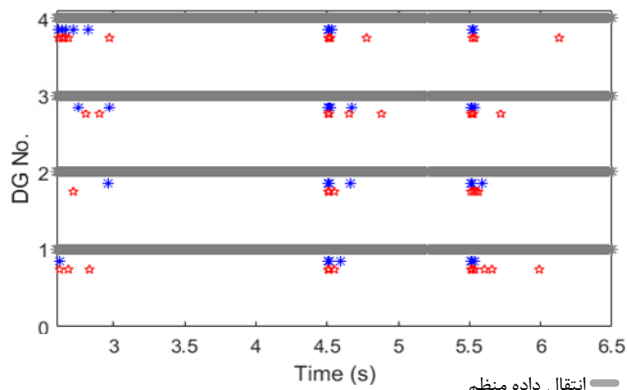
شکل ۸: نمودار تغییرات خطا و تابع آستانه برای اینورتر ۱ در روش انتقال داده نامنظم مستقل از شرایط.

جایگزین مناسبی برای انتقال داده منظم باشد. همچنین جهت درک بهتر از عملکرد انتقال داده نامنظم وابسته به شرایط، نمودارهای مربوط به پارامتر خطای بین نمونه ارسالی قبلی و نمونه واقعی حال حاضر  $(e)$  و تابع آستانه  $(\Delta)$  برای منبع شماره ۱ در شکل ۷ نشان داده شده است. هرگاه خطا از مقدار آستانه‌ای که خود وابسته به شرایط است تجاوز نماید، یک داده جدید به منابع مجاور منتقل خواهد شد. شایان ذکر است که خطای مذکور بعد از ارسال نمونه جدید صفر می‌شود.

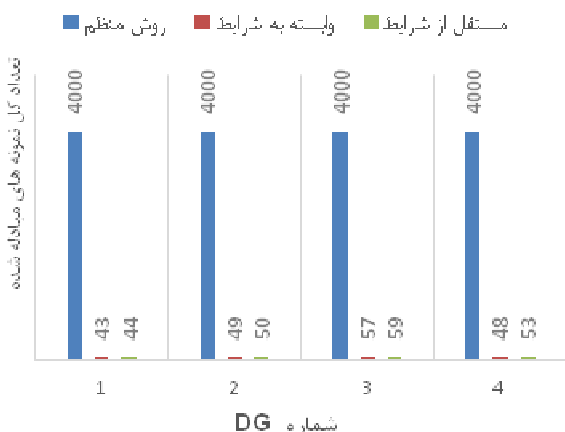
#### ۳-۵ انتقال داده نامنظم مستقل از شرایط

عملکرد کنترل ثانویه توزیع شده مبتنی بر الگوریتم اجماعی با استفاده از انتقال داده نامنظم مستقل از شرایط به طور مشابه با بخش‌های فوق، شبیه‌سازی شده است. پارامتر  $c = 25 \times 10^{-3}$  و مابقی صفر در نظر گرفته شده‌اند. نتایج حاصل از پیاده‌سازی این پروتکل ارتباطی شامل فرکانس ریزشکه، توان اکتیو و راکتیو تولیدی منابع و ولتاژ شین‌ها مشابه با شکل‌های ۵ و ۶ به دست می‌آید، لذا از نمایش آنها خودداری شده است. شکل ۸ نمودار خطای بین دو نمونه ارسالی قبلی و نمونه واقعی حال حاضر را نسبت به مقدار آستانه ثابت مستقل از شرایط نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است با توجه به مستقل بودن آستانه به شرایط عملکردی ریزشکه، زمان و نرخ انتقال داده با روش وابسته به شرایط بسیار متفاوت خواهد بود. این تفاوت در زمان‌های اغتشاش مانند تغییر بار به وضوح مشخص است. اگر مقدار آستانه ثابت در این روش بزرگ انتخاب شود، زمان بین انتقال داده طولانی می‌شود و ممکن است عملکرد کنترل ثانویه را با مشکل مواجه نماید. در مقابل، اگر این مقدار کوچک انتخاب شود فاصله زمانی بین انتقال داده بسیار کوچک و نزدیک به هم شده و ممکن است نرخ تبادل داده و به کارگیری از شبکه مخابراتی از روش انتقال داده منظم نیز بیشتر شود.





شکل ۱۱: نمودار زمانی انتقال داده‌ها برای همه منابع در سه روش انتقال داده در کل بازه شبیه‌سازی.



شکل ۱۲: میزان داده‌های مبادله شده برای سه روش انتقال داده در طول زمان فعال بودن کنترل ثانویه در شبیه‌سازی زمانی.

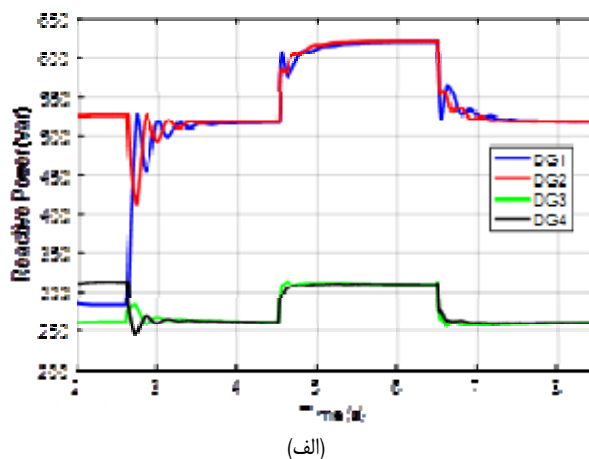
ماندگار بدون نوسان انجام شده و اثر نامطلوب تأخیر زمانی تا حد قابل قبولی برطرف شود. با توجه به شکل ۱۰-۱ ج با افزایش تأخیر زمانی در انتقال داده به مقدار ۴۰۰ میلی‌ثانیه، سیستم ناپایدار شده است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تأخیر زمانی، عملکرد الگوریتم اجماعی مختل شده و سبب ناپایداری می‌گردد. بیشینه تأخیر زمانی طبق (۲۷) محاسبه می‌شود [۲۲]

$$0 \leq \tau < \frac{\pi}{2\lambda_N} = 0.3925 \text{ sec} \approx 400 \text{ ms} \quad (27)$$

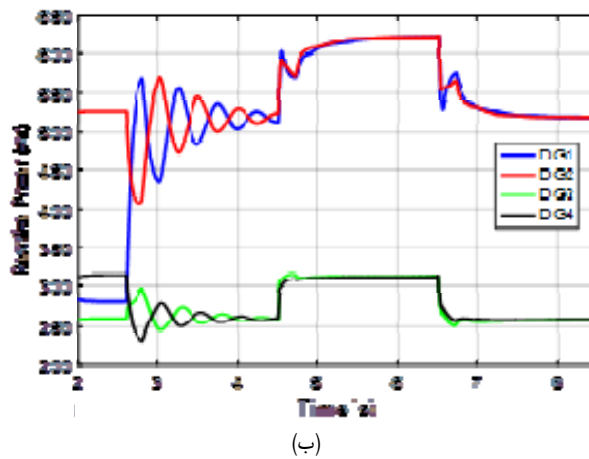
### ۵-۵ مقایسه نتایج سه روش انتقال داده

به منظور ارزیابی هر یک از سه روش فوق در میزان انتقال داده و مقایسه بین آنها، فواصل زمانی انتقال داده برای هر یک از منابع در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در روش انتقال منظم هر منبع در فواصل زمانی یکسان به تبادل داده با منابع دیگر می‌پردازد، در حالی که در روش انتقال نامنظم فواصل زمانی انتقال داده متغیر بوده که به شرایط بهره‌برداری از ریزشبکه بستگی دارد.

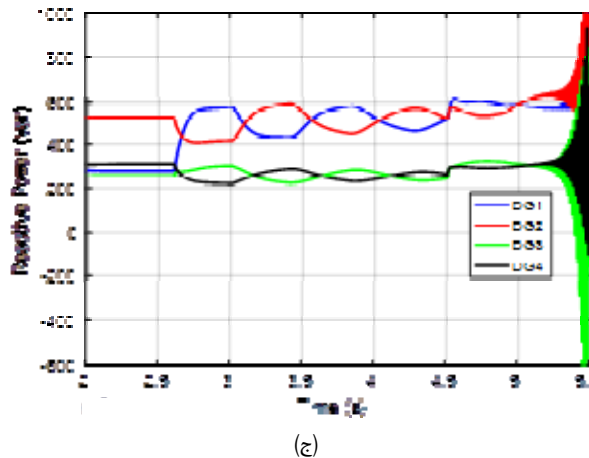
همچنین میزان داده‌های مبادله شده برای این سه روش برای همه منابع برای کل زمان شبیه‌سازی شده در شکل ۱۲ به نمایش درآمده است. از شکل به راحتی می‌توان دریافت که میزان تبادل داده به طور مؤثری کاهش یافته است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰: توان راکتیو منابع در کنترل ثانویه توزیع شده با انتقال داده نامنظم مستقل از شرایط، شامل (الف) با تأخیر زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه، (ب) با تأخیر زمانی ۲۰۰ میلی‌ثانیه و (ج) با تأخیر زمانی ۴۰۰ میلی‌ثانیه.

می‌باشد. با توجه به این که تنها رگولاتور توان راکتیو به انتقال داده می‌پردازد، نتایج مربوط به ولتاژ و توان راکتیو خروجی منابع در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب مشخص است تأخیر زمانی می‌تواند بر عملکرد سیستم در زمان‌های ابتدایی یک تغییر مانند تغییر بار، اثرگذار باشد و آن را با مشکل مواجه نماید. به راحتی می‌توان دریافت که تأخیر زمانی بر روی پارامتر مبادله شده (توان راکتیو) تأثیر بیشتری داشته و دارای نوسان قابل توجهی است و مدت زمانی طول می‌کشد تا به حالت پایدار دائمی خود برسد.

هرچند وجود زمان کافی و تأخیر زمانی کمتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه از یک سو و عملکرد کلی الگوریتم اجماعی با هدف همگرایی کمیت مبادله شده بین عامل‌ها از سویی دیگر، سبب شده تا تسهیم توان راکتیو در حالت

- [10] J. C. V. Quintero, *Decentralized Control Techniques Applied to Electric Power Distributed Generation in Microgrids*, A Ph.D. Dissertation, Politecnica De Catalunya, 2009.
- [11] Q. Li, F. Chen, M. Chen, J. M. Guerrero, and D. Abbott, "Agent-based decentralized control method for islanded microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 637-649, Mar. 2016.
- [12] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, and J. M. Guerrero, "Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3462-3470, Aug. 2013.
- [13] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Distributed secondary control for islanded microgrids-a novel approach," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 1018-1031, Feb. 2014.
- [14] A. A. A. Radwan and Y. A. R. I. Mohamed, "Networked control and power management of AC/DC hybrid microgrids," *IEEE Systems J.*, vol. 11, no. 3, pp. 1662-1673, Sept. 2014.
- [15] Q. Shafiee, *Multi-Functional Distributed Secondary Control for Autonomous Microgrids*, Ph.D. Thesis, Department of Energy, Aalborg University, 2014.
- [16] L. Meng, et al., "Distributed voltage unbalance compensation in islanded microgrids by using a dynamic consensus algorithm," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 827-838, Jan. 2016.
- [17] Q. Shafiee, V. Nasirian, J. M. Guerrero, F. L. Lewis, and A. Davoudi, "Team-oriented adaptive droop control for autonomous AC microgrids," in *Proc. Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1861-1867, Dallas, TX, USA, 29 Oct.-1 Nov. 2014.
- [18] Q. Shafiee, V. Nasirian, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, and A. Davoudi, "A multi-functional fully distributed control framework for AC microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3247-3258, Jul. 2018.
- [19] H. Zhang, S. Kim, Q. Sun, and J. Zhou, "Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1749-1761, Jul. 2017.
- [20] D. V. Dimarogonas, E. Frazzoli, and K. H. Johansson, "Distributed event-triggered control for multi-agent systems," *IEEE Trans. on Autom. Control*, vol. 57, no. 5, pp. 1291-1297, May 2012.
- [21] Z. Lv, Z. Wu, X. Dou, and M. Hu, "Discrete consensus-based distributed secondary control scheme with considering time-delays for DC microgrid," in *Proc. IECON 41st Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2898-2903, Yokohama, Japan, 9-12 Nov. 2015.
- [22] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," in *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 215-233, Jan. 2007.
- [23] L. Ding, Q. L. Han, X. Ge, and X. M. Zhang, "An overview of recent advances in event-triggered consensus of multiagent systems," *IEEE Trans. Cybernetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1110-1123, Apr. 2018.

**محی‌الدین گنجیان ابوخیلی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ از دانشگاه فردوسی مشهد و شهید بهشتی به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکترای مهندسی برق- قدرت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل کنترل و بهره‌برداری از ریزشبکه و دینامیک سیستم قدرت می‌باشد.

**مجید شهبابی** در سال ۱۳۷۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تبریز و در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۸ مدارک کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق- قدرت خود را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. از سال ۱۳۸۸ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به عنوان عضو هیأت علمی مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز دانشیار این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده شامل دینامیک سیستم قدرت، کنترل و بهره‌برداری از سیستم قدرت در حضور منابع تولید پراکنده و ریزشبکه‌ها می‌باشد.

**قباد شفیعی** در سال ۱۳۹۳ مدرک دکترای مهندسی برق را از دانشگاه البرگ دانمارک دریافت نمود. ایشان در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق، مدیر روابط بین‌الملل و معاون مرکز پژوهشی ریزشبکه و شبکه‌های هوشمند دانشگاه کردستان می‌باشد. ایشان عضو ارشد انجمن مهندسی برق و الکترونیک آمریکا (IEEE) هستند که تحت عنوان محقق پسادکتری و استاد مهمان در دانشگاه‌های البرگ دانمارک و تگزاس- آرلینگتون آمریکا دوره‌هایی را گذرانده‌اند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده شامل مدل‌سازی، مدیریت انرژی و کنترل ریزشبکه‌ها و سیستم‌های مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت و همچنین کنترل پیش‌بین و کنترل بهینه شبکه‌های هوشمند می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش کنترل ثانویه توزیع‌شده با اهداف جبران‌سازی ولتاژ، فرکانس و تسهیم دقیق توان راکتیو مبتنی بر الگوریتم اجماعی با استفاده از روش انتقال داده نامنظم پیشنهاد شده است. با توجه به ضعف‌های مطرح‌شده برای روش کنترل مشخصه افتی، کنترل ثانویه توزیع‌شده با سه رگولاتور پیاده‌سازی گردید. با توجه به ذات گسسته لینک مخابراتی بین واحدها، معادلات در فضای گسسته برای الگوریتم اجماعی ارائه گردید. به منظور کاهش میزان تبادل داده در روش انتقال منظم، روش انتقال داده نامنظم پیشنهاد گردید. در روش انتقال داده نامنظم دو روش وابسته به شرایط و مستقل از شرایط پیشنهاد و روابط مربوط به همراه پارامترهای کنترلی ارائه گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داده که روش انتقال داده نامنظم می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای انتقال داده منظم باشد. همچنین میزان داده‌های مبادله‌شده به صورت قابل توجهی کاهش یافته است. شایان ذکر است روش انتقال داده نامنظم وابسته به شرایط دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش مستقل از شرایط دارد به نحوی که به میزان بیشتری تبادل داده را کاهش داده است. همچنین اثر تأخیر زمانی به عنوان یک پدیده نامناسب در شبکه مخابراتی غیر ایده‌آل، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داده که تأخیر زمانی بر عملکرد کنترل‌کننده‌ها و ریزشبکه در حالت گذار تأثیرگذار بوده و در حالت ماندگار اثر قابل توجهی ندارد.

## ۷- سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره ۹۵/۱۸۰۱۲۰۹۳۵/BNUT/ اعلام می‌دارند.

## مراجع

- [1] N. Hatzigiorgiou, *Microgrids: Architectures and Control*, John Wiley & Sons, 2013.
- [2] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Autonomous active power control for islanded ac microgrids with photovoltaic generation and energy storage system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 4, pp. 882-892, Dec. 2014.
- [3] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Reactive power sharing and voltage harmonic distortion compensation of droop controlled single phase islanded microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1149-1158, May 2014.
- [4] L. Meng, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Tertiary and secondary control levels for efficiency optimization and system damping in droop controlled DC-DC converters," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2615-2626, Nov. 2015.
- [5] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1390-1402, Apr. 2013.
- [6] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-a general approach toward standardization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011.
- [7] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012.
- [8] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, and Z. M. Qian, "Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 576-588, Feb. 2011.
- [9] A. Bidram, A. Davoudi, and F. L. Lewis, "A multiobjective distributed control framework for islanded AC microgrids," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 3, pp. 1785-1798, Aug. 2014.