مروری بر روش‌های کنترل ولتاژ شبکه‌های تغذیه جریان مستقیم راه‌آهن برقی

روزبه اسد1

1 استادیار دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ asad@iust.ac.ir

چکيده

وظیفه اصلی شبکه تغذیه راه‌آهن برقی تأمین توان قطار در حال حرکت می‌باشد. در حالت کلی، اين شبکه‌ تغذیه مي‌تواند به صورت ‌AC و يا DC باشد. شبکه تغذیه DC سهم قابل‌توجهی از شبکه تغذیه راه‌آهن برقی را به خود اختصاص داده است. یکی از موضوعات بسيار مهم در رابطه با شبکه تغذیه DC، کنترل ولتاژ آن می‌باشد. به کارگیری روش مناسب کنترل ولتاژ در شبکه تغذیه DC راه‌آهن برقی می‌تواند منجر به بهبود کیفیت ولتاژ، کاهش هزینه‌ها، افزایش پتانسیل بازگشت توان و افزایش قابلیت اطمینان گردد. مسئله‌ای که در این شبکه تغذیه، خصوصاً در بعد اجرا، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله، ضمن تشریح اصول حاکم بر کنترل ولتاژ شبکه‌ تغذیه DC، به بررسی انواع روش‌های کنترل ولتاژ این شبکه تغذیه و مزایا و معایب هر یک از آنان خواهیم پرداخت.

کلمات کليدی: شبکه تغذیه راه‌آهن برقی، شبکه‌ تغذیه DC، کنترل ولتاژ، کنترل توان اکتیو، کنترل غیرمتمرکز.

1- مقدمه

يکي از مباحث جديدي که در سال‌هاي اخير در زمينه شبکه‌های تغذیه مطرح شده است، به‌کارگیری سيستم DC در شبکه‌های تغذیه (با کاربردهای متنوع و نه تنها راه‌آهن برقی) و يا به عبارت ديگر شبکه‌های تغذیه DC مي‌باشد. البته اولین شبکه‌هاي تغذیه DC در بیش از 130 سال پیش و توسط توماس ادیسون با کاربرد مصارف شهری ایجاد شده‌اند. در حقیقت، اولین سیستم‌های قدرت که توسط ادیسون بوجود آمدند، از نوع DC بودند. در سیستم‌های قدرت مذکور، ولتاژ DC بر تمامی ژنراتورها، شبکه‌های توزیع و برق مصرفی مشترک‌ها حاکم بود. البته پس از مدتی، به دلیل برخی از محدودیت‌های سیستم قدرت DC در آن زمان، خصوصاً عدم امکان انتقال توان DC در خطوط طولانی، جورج وستینگهاوس نسبت به تأسیس سیستم‌های قدرت AC اقدام نمود. در نتیجه رقابت بسیار شدیدی بین طرفداران سیستم‌های قدرت DC و AC رخ داد که از آن در تاریخ علم با عنوان "جنگ جریان‌ها" یاد می‌کنند. در نهایت، علی‌رغم مخالفت‌های بسیار شدید ادیسون، سیستم قدرت AC در این رقابت پیروز گردید و هر روز سیستم‌های قدرت AC بیشتری ایجاد شد. این رویداد سمت و سوی توسعه سیستم‌های قدرت را در قرن بیستم تعیین کرد و در نهایت، ولتاژ AC برای بیش از یک قرن ولتاژ اصلی سیستم قدرت موجود گردید ]1[ و ]2[. البته در این زمینه استثناهایی، از جمله شبکه تغذیه راه‌آهن برقی، نیز وجود دارد. شبکه تغذیه راه‌آهن برقی از سالیان بسیار دور به دو صورت AC و DC مورد بهره‌برداری قرار ‌گرفته است. با گذشت بیش از 100 سال از زمان جنگ جریان‌ها، صنعت برق و شبکه‌های تغذیه تغییرات بسیار چشمگیری را تجربه کرده که موجب برتری و گسترش سریع‌تر شبکه‌های تغذیه DC، حداقل در برخی از کاربردها، گردیده است. برخی از این تغییرات عبارتند از افزایش سهم بارهای الکتریکی با سازگاری بیشتر با ولتاژ DC، ظهور و گسترش روزافزون منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر با خروجی ولتاژ DC و یا غیرسینوسی، کارایی بهتر اغلب سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی مهم با ولتاژ DC، بیشتر بودن قابليت اطمينان شبکه‌های تغذیه DC، سازگاري بیشتر ترانسفورماتورهاي الکترونيک قدرتي با شبکه‌های تغذیه DC، افزايش سلامت و ايمني انسان در شبکه‌های تغذیه DC با ولتاژهای پایین، پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه علم و صنعت الکترونیک قدرت و از همه مهم‌تر عدم وجود توان راکتيو و مشکلات ناشي از آن در شبکه تغذیه DC. به نظر می‌رسد که موارد مذکور در آینده نه چندان دور منجر به افزایش روزافزون سهم شبکه تغذیه DC در راه‌آهن برقی نیز خواهد شد. یکی از موضوعات بسيار مهم در رابطه با شبکه تغذیه DC، کنترل ولتاژ آن است. به کارگیری روش مناسب کنترل ولتاژ در شبکه تغذیه DC راه‌آهن برقی می‌تواند منجر به بهبود کیفیت ولتاژ، کاهش هزینه‌ها، افزایش پتانسیل بازگشت توان و افزایش قابلیت اطمینان گردد. مسئله‌ای که در شبکه تغذیه DC راه‌آهن برقی، خصوصاً در بعد اجرا، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. یکی از دلایل این مهم به کارگیری یکسوسازهای دیودی در اغلب شبکه‌های تغذیه DC راه‌آهن برقی می‌باشد. این یکسوسازهای قادر به کنترل ولتاژ خروجی خود و همچنین بازگشت توان به سیستم قدرت نیستند. این موضوع در فرآیند بازگشت توان قطارها در شبکه تغذیه DC محدودیت ایجاد می‌کند. با توجه به اهمیت روزافزون بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های اقتصادی راه‌آهن برقی، به نظر می‌رسد که در آینده نزدیک شاهد ظهور استفاده از مبدل‌های با قابلیت بازگشت توان (برای نمونه مبدل‌های تریستوری) در شبکه‌های تغذیه DC راه‌آهن برقی خواهیم بود. در این صورت امکان اجرای روش‌های کنترل ولتاژ و همچنین اهمیت استفاده از آنان به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. نکته دیگری که در آینده اهمیت استفاده از روش‌های کنترل ولتاژ را افزایش خواهد داد، رویکرد به کارگیری منابع متنوع و با هزینه تولید متفاوت تجدیدپذیر و پراکنده در راه‌آهن برقی است. در این شرایط، با استفاده از روش کنترل ولتاژ مناسب می‌توان با تغییر سهم هر یک از منابع در تغذیه شبکه، ضمن حفظ قیود فنی، بهره‌وری اقتصادی شبکه‌های تغذیه DC راه‌آهن برقی را نیز افزایش داد. در این مقاله، ضمن تشریح اصول کنترل ولتاژ شبکه‌ تغذیه DC، به بررسی انواع روش‌های کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC و مزایا و معایب هر یک از آنان خواهیم پرداخت.

**2- اصول کنترل ولتاژ شبکه‌ تغذیه DC**

در شبکه‌های تغذیه DC، جريان توان راکتيو صفر مي‌باشد. از طرفي با توجه به DC بودن ولتاژ اين شبکه‌ها، فرکانس نيز صفر بوده و در نتيجه نيازي به کنترل توان راکتيو و فرکانس شبکه تغذیه نيست. اما براي تأمین تغذيه مناسب بارهاي موجود در اين شبکه تغذیه، بايد اندازه ولتاژ در سرتاسر شبکه در محدوده مجاز معيني قرار گيرد. بنابراين در شبکه‌های تغذیه DC بايد اندازه ولتاژ توسط اجزاء فعال شبکه کنترل شود. به طور کلي اجزاء فعال شبکه تغذیه DC عبارت از منابع انرژی، پست AC-DC، واحدهاي ذخيره‌ساز، جبران‌سازها و در برخي موارد بارها مي‌باشند. خاطر نشان مي‌گردد که پست AC-DC حاوی مبدل و يا هر وسيله ديگر کنترل‌کننده جريان توان بين شبکه AC و DC مي‌باشد. اولين قدم براي کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC تعيين عوامل تأثیرگذار بر عدم تنظيم ولتاژ اين شبکه است. برخي از عوامل تأثیرگذار بر عدم تنظيم ولتاژ شبکه تغذیه DC، عدم تعادل در توان اکتيو مصرفي و توليدي (عدم تعادل توان)، عدم کنترل ولتاژ مناسب توسط منابع انرژي، از جمله پست AC-DC و واحدهاي ذخيره‌ساز، عدم هماهنگي بين منابع انرژي در کنترل ولتاژ و افت ولتاژ در خطوط می‌باشند.

بايد توجه داشت که هنگام فزوني توان اکتيو مصرفي بر توان اکتيو توليدي، ولتاژ شبکه تغذیه DC روند نزولي و هنگام فزوني توان اکتيو توليدي بر توان اکتيو مصرفي، ولتاژ اين شبکه تغذیه روند صعودي خواهد داشت. بدين ترتيب در صورت وقوع عدم تعادل در توان اکتيو مصرفي و توليدي و عدم رفع به هنگام آن توسط اجزاء فعال شبکه، اندازه ولتاژ شبکه تغذیه از محدوده مجاز فراتر مي‌رود. حال در صورتي که روند مذکور ادامه يافته و اصلاح نگردد، اندازه ولتاژ شبکه تغذیه DC به تغييرات خود ادامه داده و سيستم‌هاي حفاظتي عمل کرده و شبکه تغذیه DC ناپايدار خواهد شد. اين همان مسئله اشاره‌شده در مورد 1 مي‌باشد. به عبارت دیگر، ارتباط تنگاتنگ بین کنترل ولتاژ و کنترل توان اکتیو در شبکه‌ تغذیه DC وجود دارد. جهت توضیح بیشتر، این ارتباط تنگاتنگ در شبکه‌ تغذیه DC ساده شکل 1 نشان داده خواهد شد. خط شبکه‌ تغذیه مذکور با مدل T، یک خازن، دو سلف و دو مقاومت، مدل‌سازی شده است. با توجه به بررسی تغییرات ولتاژ در این قسمت، خازن و سلف خط قابل صرف‌نظر نیستند. در حقیقت، خازن‌ها و سلف‌های خطوط تنها در تحلیل حالت ماندگار قابل صرف‌نظر می‌باشند. بار شبکه‌ تغذیه مورد نظر نیز به صورت بار توان ثابت مدل می‌گردد.

Drawing7

شکل 1: یک شبکه‌ تغذیه DC ساده

اگر ولتاژهای شبکه‌ تغذیه ثابت باشند، رابطه زیر برقرار خواهد بود:

(1)



که در آن، تغییرات ولتاژ خازن بین زمان *t0* و *t* می‌باشد. همچنین، جریان مصرفی خازن است. *C* مقدار خازن می‌باشد. بنابراین،



**(2)**



**(3)**



**(4)**



که در آن، و به ترتیب جریان تزریقی منبع و جریان مصرفی بار می‌باشند. همچنین، و به ترتیب ولتاژ منبع و بار می‌باشند. از طرف دیگر، توان مصرفی بار، ، و توان تولیدی منبع، ، برابرند با:



**(5)**



**(6)**



به دلیل ثابت بودن و ، با توجه به (5)، نیز ثابت خواهد بود. بنابراین، می‌توان (4) را به صورت زیر بازنویسی کرد:



**(7)**



با جایگذاری ، در (5)، توسط (7)، رابطه زیر حاصل خواهد شد:



**(8)**



با توجه به (3)، (6) و (8)، توان تولیدی منبع برابر است با:

**(9)**



که در آن، تلفات توان خط می‌باشد. بنابراین، شرط لازم برای پایدار و ثابت بودن ولتاژ در شبکه‌ تغذیه DC تحقق تعادل توان در این شبکه‌ تغذیه است. حال، اگر تعادل توان در شبکه‌ تغذیه شکل 1 تحقق یابد، به عبارت دیگر، اگر توان تولیدی برابر مجموع توان مصرفی بار و تلفات توان خط الکتریکی باشد، رابطه زیر برقرار خواهد بود:



**(10)**



بنابراین،

**(11)**



**(12)**



که در آن، و به ترتیب توان مصرفی خازن و سلف‌ها می‌باشند. همچنین، ولتاژ سلف‌ها می‌باشد. با توجه به و (11)، رابطه زیر به دست می‌آید:



**(13)**



در نتیجه،

**(14)**



**(15)**



همچنین، با توجه به و (12)، روابط زیر صادق خواهند بود:



**(16)**



**(17)**



از طرف دیگر،

**(18)**



**(19)**



بنابراین، با توجه به (15)، (17)، (18) و (19)، روابط زیر حاصل خواهند شد:

**(20)**



**(21)**



بنابراین، هنگامی که تعادل توان شبکه‌ تغذیه DC تحقق می‌یابد، ولتاژ شبکه‌ تغذیه DC پایدار و ثابت خواهد بود. با توجه به بررسی‌های فوق‌الذکر، شرط لازم و کافی برای ثابت و پایدار بودن ولتاژ شبکه‌ تغذیه DC، برقراری تعادل توان در شبکه‌ تغذیه می‌باشد.

جهت نمایش جنبه دیگری از رابطه تنگاتنگ کنترل توان اکتیو و کنترل ولتاژ در شبکه‌هاي تغذیه DC، شبکه‌ تغذیه شکل 1 را در نظر بگیرید. فرض کنید که تعادل توان در شبکه‌ تغذیه مذکور برقرار و ولتاژ DC آن ثابت باشد. حال دو حالت ممکن در شبکه‌ تغذیه بررسی می‌گردد:

**حالت 1)** فرض کنید توان مصرفی بار کاهش و یا توان تولیدی منبع افزایش یابد، به عبارت دیگر، توان تولیدی از توان مصرفی پیشی بگیرد. در این حالت، مقداری توان اکتیو اضافی سرگردان در شبکه ایجاد می‌شود. این توان خازن را شارژ کرده و در نتیجه، ولتاژ خازن را به صورت پیوسته افزایش می‌دهد. اگر تعادل توان به‌زودی دوباره برقرار نگردد، ولتاژ شبکه‌ تغذیه از حداکثر مقدار مجاز خود فراتر رفته و شبکه‌ تغذیه ناپایدار خواهد شد.

**حالت 2)** فرض کنید توان تولیدی منبع کاهش و یا توان مصرفی بار افزایش یابد، یعنی، توان تولیدی کمتر از توان مصرفی گردد. در این حالت، در چند میلی‌ثانیه ابتدایی، بار توان ثابت کمبود توان اکتیو خود را با دشارژ خازن جبران کرده و در نتیجه، ولتاژ خازن را به صورت مداوم کاهش می‌دهد. در صورتی که تعادل توان به‌زودی دوباره برقرار نشود، ولتاژ شبکه‌ تغذیه از حد مقدار مجاز خود کمتر شده و شبکه‌ تغذیه ناپایدار خواهد گردید.

دو حالت فوق‌الذکر نشان می‌دهند که افزایش و کاهش ولتاژ شبکه‌ تغذیه DC به ترتیب نشان‌دهنده مازاد و کمبود توان تولیدی در شبکه‌ تغذیه می‌باشند. با توجه به آنچه گفته شد، کنترل ولتاژ شبکه‌ تغذیه DC از طریق کنترل توان اکتیو تحقق می‌یابد. بنابراین، روش کنترل ولتاژ DC مناسب باید میزان توانی که هر منبع باید تولید کند را تعیین و به نحوی به منبع مربوطه اطلاع دهد. از طرف دیگر، ولتاژ DC می‌تواند به عنوان سیگنال بازخورد (فیدبک) در فرآیند کنترل توان اکتیو مورد استفاده قرار گیرد. شایان ذکر است که شباهت‌هایی بین ارتباط کنترل توان اکتیو و کنترل ولتاژ در شبکه‌ تغذیه DC و ارتباط کنترل توان اکتیو و کنترل زاویه بار در شبکه‌ تغذیه AC وجود دارد.

خاطر نشان مي‌شود که براي تنظيم مقدار توان اکتيو توليدي شبکه تغذیه DC بايد توان اکتيو توليدي تمامي اجزاي فعال شبکه را از جمله منابع انرژی، پست AC-DC، واحدهاي ذخيره‌ساز و جبران‌سازها، همزمان کنترل نمود. بنابراين، همان‌طور که در مورد 2 اشاره گرديد، يکي از موارد ضروري جهت کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC، توانايي منابع انرژي در کنترل مناسب توان اکتيو توليدي و يا ولتاژ خروجي خود مي‌باشد.

در رابطه با مورد 3 نيز بايد توجه داشت که در صورتي که منابع انرژي به صورت مستقل نسبت به کنترل ولتاژ شبکه تغذیه اقدام نمايند، مشکلاتي به وجود خواهد آمد. يکي از مشکلات، ايجاد جريان گردشي در اين شبکه، ناشي از اختلاف هرچند اندک ولتاژ خروجي منابع انرژي مي‌باشد. مشکل ديگر توزيع نامتناسب وظيفه تأمین توان اکتيو مورد نياز شبکه تغذیه است. براي توضيح بيشتر اين مسئله بايد گفت که در صورت عدم وجود هماهنگي و قانون مشخص در بين منابع انرژي، امکان دارد که يک منبع انرژي گران‌قیمت با حداکثر ظرفيت خود، و در عين حال منابع انرژي ارزان‌قیمت با درصد کمي از ظرفيت نامي خود، به توليد انرژي بپردازند. بنابراین در صورت عدم هماهنگي بين منابع انرژي جهت کنترل ولتاژ، امکان فعاليت اين منابع در نزديکي نقاط کار بهينه خود و همچنين فعاليت شبکه در اقتصادي‌ترين حالت، ممکن نيست. عدم هماهنگي بين منابع انرژي در کنترل ولتاژ مي‌تواند موجب ناپايداري سريع شبکه تغذیه DC نيز گردد. زيرا در صورتي‌ که تمامي منابع انرژي مستقلاً، جهت به صفر رساندن خطاي ولتاژ شبکه تغذیه، نسبت به کاهش و افزايش انرژي تزريقي اقدام کنند، در امر کنترل ولتاژ يکديگر اختلال ایجاد کرده و شبکه تغذیه DC به سرعت ناپايدار خواهد گرديد.

همان‌طور که گفته شد، در شبکه DC، برخلاف شبکه AC، بين کنترل ولتاژ و کنترل توان اکتيو رابطه‌اي تنگاتنگ وجود دارد. به عبارت ديگر، جهت کنترل ولتاژ، مي‌توان مقدار توان اکتيو توليدي منابع انرژي را تنظيم نمود. بر عکس اين مسئله نيز صادق مي‌باشد. مشکلي که در مسئله کنترل ولتاژ وجود دارد، عدم يکسان بودن اندازه ولتاژ در کل شبکه، ناشي از مقاومت خطوط، مي‌باشد. افت ولتاژ در خطوط و عدم يکسان بودن اندازه ولتاژ در شبکه تغذیه DC، برخلاف آنچه در رابطه با فرکانس در شبکه‌هاي AC وجود دارد، موجب مي‌شود که از اندازه ولتاژ نتوان به سادگي براي هماهنگي بين منابع انرژي، جهت تزريق ميزان مناسب توان اکتيو و کنترل اندازه ولتاژ در کل شبکه تغذیه، استفاده نمود. به بيان ديگر همان‌طور که در مورد 4 اشاره گرديد، در صورتي که تدابيري مناسب انديشيده نشود، افت ولتاژ در خطوط موجب اختلال در تنظيم و کنترل ولتاژ مي‌گردد.

یکی از مسائل مهمی‌ که در کنار کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC مطرح می‌شود، تعيين اندازه ولتاژ نامی بهينه شبکه تغذیه DC مي‌باشد. جهت تعيين ولتاژ نامی بهينه يک شبکه تغذیه DC، باید تأثیر اندازه ولتاژ در افت ولتاژ و تلفات توان، تأثیر اندازه ولتاژ در حداکثر جريان عبوري از کابل‌ها، تأثیر اندازه ولتاژ در مشخصات واحد ذخيره‌ساز (تعداد باتري‌ها و ...)، تأثیر اندازه ولتاژ در پست AC-DC، تأثیر اندازه ولتاژ در هزينه‌هاي اوليه نصب و بهره‌برداري و تأثیر اندازه ولتاژ در حفاظت در برابر خطا مورد بررسي قرار گیرند ]3[. در حال حاضر ولتاژهای 750، 1500 و 3000 ولت در شبکه تغذیه DC راه‌آهن برقی مرسوم است. البته انتظار می‌رود که سطح ولتاژ مذکور در آینده افزایش یابد.

**3- کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC**

خاطر نشان می‌شود که در مقایسه با تحقیقات موجود در زمینه کنترل ولتاژ شبکه‌هاي تغذیه AC، تاکنون تحقیقات معدودی در زمینه کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC انجام شده است. در اين قسمت به روش‌هاي مختلف کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC اشاره خواهد گرديد. به طور کلی روش‌های موجود کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC را به پنج دسته می‌توان تقسیم نمود:

**3-1- کنترل ولتاژ شبکه‌های تغذیه DC خاص**

برخی از روش‌های کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC تنها برای کنترل یک شبکه‌ تغذیه خاص ارائه شده‌اند ]4[،]5[و]6[-]11[. بنابراین، امکان استفاده از آنان در شبکه‌هاي تغذیه DC با ابعاد، توپولوژی و منابع مختلف وجود ندارد. برای نمونه، ]9[ یک روش کنترل ولتاژ جهت تنظیم ولتاژ یک باس DC که چندین ژنراتور بادی آهنربای دائم به آن متصل می‌باشند، ارائه می‌کند. روش مذکور بر پایه یک طرح کنترلی هیسترزیس تابع-متبوع (Master–Slave) بنا نهاده شده است. همچنین، در ]10[ یک روش کنترلی جهت تنظیم پارامترهای مختلف، از جمله ولتاژ پایانه، بارهای DC که مستقیماً به چندین منبع DC مختلف متصل بوده و اختیار انتخاب یکی از این منابع را به عنوان تغذیه خود دارا می‌باشند می‌پردازد. در حقیقت، روش مذکور اهداف خود را از طریق انتخاب بهترین منبع، از بین منابع موجود، جهت تغذیه بارهای DC مورد نظر تحقق می‌دهد.

همچنین، باید توجه داشت که شبکه‌های خاص مورد نظر اغلب تحقیقات فوق‌الذکر بسیار کوچک هستند ]4[،]5[،]6[-]8[و]11[. به عبارت دیگر، شبکه‌های مذکور عملاً چیزی بیش از یک گره که همه بارها و منابع موجود به آن متصل شده‌اند، نمی‌باشند. برای نمونه، در ]5[ یک سيستم کنترل تطبيقي براي یک شبکه تغذیه DC بسیار کوچک (گره DC) که در حقیقت یک مرکز داده (Data Center) می‌باشد، ارائه شده است. هدف از روش کنترلی مذکور، تأمين تغذيه‌اي بدون وقفه براي بارهاي DC حساس، تأمين حداکثري تغذيه بار AC غیرحساس و فروختن انرژي در زمان گراني انرژي به شبکه AC مي‌باشد. همچنین، مرجع ]8[ به کنترل يک شبکه تغذیه DC بسیار کوچک (گره DC) دیگر شامل منابع انرژي خورشيدي، بادي و ژنراتور گازي و واحدهاي ذخيره‌سازي همچون باتري، پرداخته است. در اين مقاله بلوک‌هاي کنترلي اغلب اجزاء مذکور آورده شده است.، اما جزئيات فرآیند کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC و هماهنگي‌های مورد نیاز بین اجزاء مربوطه، چندان مورد توجه قرار نگرفته است.

**3-2- کنترل شبکه‌های تغذیه DC با استفاده از ارتباطات مخابراتی**

در برخی از تحقیقات، روش‌های کنترل ولتاژ عمومی‌تری که البته به شدت نیازمند استفاده از ارتباطات مخابراتی می‌باشند ارائه شده‌اند ]11[-]14[. این روش‌ها معمولاً در شبکه‌هاي تغذیه مختلف با مشخصات متنوع قابل‌استفاده می‌باشند. اما روش‌های مذکور عمدتاً روش‌های کنترلی متمرکز محسوب شده و دارای تمامی عیوب مطرح برای این نوع از روش‌ها، از جمله قابلیت اطمینان پایین، می‌باشند. همچنین، جهت استفاده از این روش‌های مذکور، به دلیل وابستگی آنان به ارتباطات مخابراتی، ابتدا باید زیرساخت‌های مخابراتی کافی ایجاد شوند. بدیهی است که هرگونه خطا در سیستم‌های مخابراتی مورد استفاده این روش‌ها منجر به اختلال جدی در عملکرد آنان خواهد گردید. موارد مذکور موجب پیچیدگی، قابلیت اطمینان پایین و پیاده‌سازی گران روش‌های مذکور می‌شوند. بنابراین، کنترل شبکه‌های DC با استفاده از ارتباطات مخابراتی روش کنترلی کاربردیی نمی‌باشد. به همین دلیل، در بسیاری از تحقیقات همواره تلاش می‌شود که روش‌های کنترل ولتاژ غیرمتمرکز (Decentralized) و با کمترین وابستگی به ارتباطات مخابراتی ارائه شوند.

**3-3- کنترل شبکه تغذیه DC با استفاده از نظريه بازي‌ها**

مرجع ]15[ یک روش کنترل ولتاژ عمومی غیرمتمرکز برای شبکه‌هاي تغذیه DC ارائه کرده که نیازی به استفاده از ارتباطات مخابراتی ندارد. در مرجع ]15[ جهت تقسيم مسئوليت‌هاي بهره‌برداري، کنترل و تنظيم (Regulation) بين اجزا مختلف شبکه، روش نظريه بازي‌ها پيشنهاد شده که بازيگران آن توليدکنندگان و بارها مي‌باشند. بايد توجه داشت که روشی که با استفاده از حداقل اطلاعات موجود، مسئولیت کنترل را بين اجزاء مختلف تقسيم نمايد، خصوصاً در شبکه‌های تغذیه هوشمند بسيار قابل‌توجه مي‌باشد. اين نوع از کنترل غیرمتمرکز موجب افزايش قابليت اطمينان، مقاوم بودن، مدولار بودن و تسهيل گسترش سيستم قدرت مي‌گردد. مقاله مورد نظر ابتدا نحوه فرمول‌بندي مسئله سيستم قدرت مورد نظر با روش نظريه بازي‌ها را نشان داده و سپس با يک مثال ساده، نسبت به توضيح کارکرد نظريه بازي‌ها در کنترل سيستم قدرت اقدام نموده است. در روش کنترلی ارائه‌شده بارها مجهز به مبدل می‌باشند. این بارها با تغيير مقاومت خود از ديدگاه شبکه، حداقل در يک بازه زماني کوتاه، در پايداري، مقاوم بودن و بازده کل سيستم شرکت می‌کنند. هرچند روش کنترل ارائه‌شده در مرجع ]15[ غیرمتمرکز بوده و نیازی به استفاده از ارتباطات مخابراتی ندارد، اما به دلیل استفاده از نظریه بازی‌ها یک روش پیچیده محسوب می‌گردد. همچنین، این روش در برخی موارد از مشکل ناپایداری و عدم همگرایی در محاسبات رنج می‌برد. عیب مهم دیگر روش مذکور، محدود بودن کاربرد آن به شبکه‌هاي تغذیه DC کوچک می‌باشد.

**3-4- کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC با استفاده از روش شيب افتي**

متداول‌ترين روش كنترل ولتاژ شبکه DC در تحقيقات مربوطه ]16[-]25[، روش شيب افتي (Droop Control Method) مي‌باشد. روش شيب افتي یک روش کنترل ولتاژ عمومی، غیرمتمرکز و بدون نیاز به ارتباطات مخابراتی است. در اين روش منابع شبكه DC، به ازاي هر ولتاژ شبكه، موظف به تزريق مقدار مشخصي جريان به شبكه مي‌باشند. در روش شیب افتی برای هر منبع یک منحني ولتاژ-جریان موسوم به منحنی شيب افتي تعیین می‌شود. در شکل 2 نمونه‌اي از منحني شيب افتي يك منبع نشان داده شده است. با توجه به شکل 2، در روش شيب افتي، با كاهش ولتاژ شبكه منابع جريان و در نتيجه توان بيشتري به شبكه تزريق خواهند كرد. اين مسئله يك امر مطلوب است. زيرا با افزايش بار مصرفي مشتريان، اندازه ولتاژ شبكه ‌DC افت كرده كه جهت بازيابي اندازه ولتاژ بايد منابع نسبت به افزايش توليد خود اقدام كنند.

|  |  |
| --- | --- |
| ناحيه توان ثابت منبع 1  ناحيه ولتاژ ثابت منبع 1  حالت 1  حالت 2  اضافه بار  جريان بار  ولتاژ باس DC |  |
| شکل 3: نمونه‌اي از منحني DBS يک شبکه DC | شکل 2: نمونه‌اي از منحني شيب افتي يك منبع |

فرآيند به‌کاررفته در روش شيب افتي، موجب بروز ویژگی‌ها و قابليت‌هايی براي اين روش مي‌گردد. این قابلیت‌ها عبارت از تقسيم متناسب وظيفه تأمین انرژي بين منابع مختلف، هماهنگي بين عملكرد منابع و بارها و جلوگيري از ناپايداري شبكه، مجزا كردن (Decoupling) فرآيند كنترل هر يک از منابع و بارها و در نتيجه كاهش پيچيدگي‌هاي مربوطه، عدم نياز به ارتباطات مخابراتي، سادگی، قابليت اطمينان بالا، پیاده‌سازی ارزان و مدولار بودن می‌باشند. البته روش شيب افتي داراي يك عيب بزرگ است. تحقق كامل قابليت‌هاي اين روش، منوط به صفر بودن مقاومت خطوط شبكه DC مي‌باشد. به عبارت ديگر مقاومت خطوط موجب اختلال در عملكرد روش مذكور مي‌گردد. به همين دليل در تحقيقات مربوطه، اين روش را در شبكه‌های بسیار کوچک ]18[،]20[و]21[-]24[ و یا در شبكه‌های با خطوط بدون مقاومت یا ابررسانا ]16[،]17[،]19[و]25[ بررسي كرده‌اند. بنابراين استفاده از روش شيب افتي در شبكه‌هاي تغذیه DC واقعي، نيازمند تحقيقات و بررسي‌هاي بيشتري مي‌باشد. البته در برخی تحقیقات دیگر تلاش شده است که این مشکل روش شيب افتي به نوعی برطرف گردد. اما در تمامی این تحقیقات برای رفع مشکل مذکور از ارتباطات مخابراتی بهره گرفته شده است ]11[،]13[و]14[. بنابراین، به دلیل استفاده از ارتباطات مخابراتی در روش‌های حاصله، این روش‌ها علاوه بر نداشتن برخی از محاسن روش شيب افتي، شامل معایب ذکرشده برای روش‌های کنترل ولتاژ استفاده‌کننده از ارتباطات مخابراتی نیز می‌باشند.

مشكل ديگر اين روش، عدم دارا بودن قابليت اعمال اولويت توليد بين منابع مختلف است. به عبارت ديگر، اين روش تنها قادر به تقسيم متناسب وظيفه تأمین انرژي بين منابع فعال مي‌باشد. بنابراين، روش شيب افتي، به تنهايي، داراي كاربردي محدود در شبكه‌هاي تغذیه DC حاوي منابع مختلف و متنوع است. اين مشكل تاحدودي در روش ذكر شده در قسمت بعد، حل گرديده است.

**3-5- کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC با استفاده از سيگنال‌رساني باس DC**

در ]26[-]30[ از سيگنال‌رسانی باس DC (DC Bus Signaling (DBS)) و يا اندازه ولتاژ شبکه DC براي کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC استفاده شده است. در این گزارش، روش‌های ارائه شده در مراجع مذکور اصطلاحاً روش DBS نامیده می‌شوند. در حقیقت، روش DBS تکامل‌یافته روش شيب افتي بوده و از آن بهره گرفته است. در اين روش امکان اعمال اولويت توليد بين منابع مختلف فراهم شده است. به عنوان يک نکته قابل‌توجه، روش DBS براي تحقق مسئله فوق از هيچ ارتباط مخابراتي استفاده نکرده و تنها از ولتاژ شبکه DC کمک مي­گيرد. در اين روش يك منحني DBS منحصر به فرد براي هر شبكه DC تعيين مي‌گردد. منحنی DBS مذکور متشکل از منحنی‌های شیب افتی منابع موجود در شبکه مورد نظر می‌باشد. در شکل 3 نمونه­اي از منحني DBS يک شبکه DC با دو منبع متفاوت نشان داده شده است. در روش DBS، هر منبع داراي يک ولتاژ آستانه (Threshold Voltage) بوده که با کاهش ولتاژ شبکه و رسيدن آن به ولتاژ مذکور، منبع متناظر با آن ولتاژ فعاليت خود را آغاز مي­کند. براي مثال، با توجه به شکل 3، ولتاژ آستانه منبع 1، *V0* و ولتاژ آستانه منبع 2، *V1* مي‌باشد. خاطر نشان مي­شود که هر منبع در زمان فعاليت خود، طبق منحني شيب افتي متناظر با خود کنترل مي­گردد.

با توجه به مطالب فوق­الذکر، روش DBS قادر به اعمال اولويت توليد بين منابع است. علاوه بر این، اين روش شامل تمامی مزاياي روش شيب افتي نيز مي­باشد. اما روش DBS نيز، همانند روش شيب افتي، داراي يك عيب بزرگ است. این روش در شبکه­هاي تغذیه واقعي با خطوط با مقاومت اهمي، قادر به تحقق كامل قابليت‌هاي خود نمی‌باشد. به همین دلیل در تمامی تحقیقات فوق‌الذکر ]26[-]30[، روش DBS در شبکه‌های بسیار کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. البته در ]28[ به صورت مختصر به راه‌حلی برای رفع عیب بزرگ فوق‌الذکر اشاره‌شده است. اما راه‌حل مذکور دارای مشکلاتی اساسی است. برخي از اين مشکلات عبارتند از:

* جهت تعيين ولتاژهاي آستانه منابع انرژي، اجراي پخش بار DC و تعيين شرايطی که منجر به بیش‌ترین افت ولتاژ در خطوط می‌شود، ضروری است.
* با هر تغيير در آرایش، منابع و بار شبکه تغذیه DC، انجام مجدد محاسبات مذکور و تغيير ولتاژ آستانه منابع الزامی است.
* به‌کارگیری راه‌حل مذکور، خصوصاً در صورت تنوع زياد منابع و ذخيره­سازهای موجود در شبکه‌ تغذیه، می‌تواند منجر به افزایش قابل‌توجه اختلاف ولتاژ گره‌ها و کاهش شدید کیفیت پروفیل ولتاژ شبکه‌ تغذیه گردد.

بنابراین راه‌حل پیشنهادی ]28[ نیز قادر به رفع عیب بزرگ روش DBS نبوده و جهت فراهم کردن امکان استفاده از روش DBS در شبکه­هاي تغذیه DC، بايد تحقيقات بيشتري صورت پذيرد.

4- نتیجه‌گیری

به کارگیری روش مناسب کنترل ولتاژ در شبکه تغذیه DC راه‌آهن برقی می‌تواند منجر به بهبود کیفیت ولتاژ، کاهش هزینه‌ها، افزایش پتانسیل بازگشت توان و افزایش قابلیت اطمینان گردد. علی‌رغم تحقیقات فراوان موجود در زمینه کنترل ولتاژ شبکه‌هاي تغذیه AC، تاکنون تحقیقات معدودی در زمینه کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC انجام شده است. روش‌های موجود کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC به پنج دسته کلی قابل تقسیم می‌باشند. دسته اول از روش‌های کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC، روش‌های کنترل ولتاژ اختصاصی می‌باشند. در حقیقت، امکان استفاده از این روش‌ها در شبکه‌هاي تغذیه DC با ابعاد، توپولوژی و منابع مختلف وجود ندارد. علاوه بر این، شبکه‌های خاص مورد نظر اغلب روش‌های مذکور بسیار کوچک بوده و عملاً چیزی بیش از یک گره که همه بارها و منابع موجود به آن متصل شده‌اند، نمی‌باشند. دسته دوم از روش‌های کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC، هرچند روش‌های کنترل ولتاژ عمومی‌تری می‌باشند، اما به شدت نیازمند استفاده از ارتباطات مخابراتی هستند. این روش‌ها معمولاً در شبکه‌هاي تغذیه مختلف با مشخصات متنوع قابل‌استفاده می‌باشند. به دلیل پیچیدگی، قابلیت اطمینان پایین و پیاده‌سازی گران، روش‌های مذکور چندان کاربردی نمی‌باشد. به همین دلیل، در بسیاری از تحقیقات همواره تلاش می‌شود که روش‌های کنترل ولتاژ غیرمتمرکز و با کمترین وابستگی به ارتباطات مخابراتی ارائه شوند. روش دیگر ارائه شده برای کنترل ولتاژ شبکه‌های تغذیه‌ DC، روش کنترل ولتاژ عمومی غیرمتمرکز و بدون نیاز به ارتباطات مخابراتی می‌باشد ]15[. علی‌رغم مزایا مذکور، این روش به دلیل دارا بودن معایب قابل‌توجه در عمل چندان کارایی موفقی ندارد. روش مذکور یک روش پیچیده و دارای مشکلات ناپایداری و واگرایی در محاسبات است. همچنین، کاربرد آن به شبکه‌هاي تغذیه DC کوچک محدود می‌باشد. دسته چهارم و پنجم از روش‌های کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC، روش شيب افتي و روش DBS می‌باشند. این روش‌ها عمومی، غیرمتمرکز، بدون نیاز به ارتباطات مخابراتی، ساده، با قابليت اطمينان بالا، ارزان و مدولار هستند. اما روش شيب افتي و روش DBS داراي يك عيب بزرگ می‌باشند که تمامی محاسن آن‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. این روش‌ها در شبکه­هاي تغذیه واقعي با خطوط با مقاومت اهمي، قادر به تحقق كامل قابليت‌هاي خود نیستند. در نتیجه، این روش‌ها تنها در شبکه‌هاي تغذیه DC با افت ولتاژ ناچیز، و یا به عبارت دیگر، شبکه‌هاي تغذیه با خطوط ابررسانا و یا شبکه‌هاي تغذیه با خطوط الکتریکی بسیار کوتاه، قابل‌استفاده می‌باشند. بنابراین می‌توان گفت هیچ کدام از روش‌های مذکور، روش کاملی برای کنترل ولتاژ اغلب شبکه‌های تغذیه DC واقعی، از جمله شبکه تغذیه راه‌آهن برقی، نمی‌باشد و پیشنهاد یک روش کنترل ولتاژ کارآمد برای شبکه‌های تغذیه DC واقعی یک زمینه تحقیقاتی مناسب برای کارهای آتی خواهد بود.

5- مراجع

[1]- C. L. Sulzberger, “Triumph of AC- from Pearl Street to Niagara,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 1, No. 3, pp. 64-67, Jun. 2003.

[2]- C. L. Sulzberger, “Triumph of AC- Part 2- The Battle of the Currents,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 1, No. 4, pp. 70-73, Aug. 2003.

[3]- A. Sannino, G. Postiglione, and M. H. J. Bollen, “Feasibility of a DC Network for Commercial Facilities,” IEEE Trans. Industry Applications, vol. 39, pp. 1409-1507, Sep./Oct. 2003.

[4]- D. Salomonsson, and A. Sannino, “Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 22, No. 3, pp. 1620–1627, Jul. 2007.

[5]- D. Salomonsson, L. Söder, and A. Sannino, “An Adaptive Control System for a DC Microgrid for Data Centers,” IEEE Trans. Industry Applications, vol. 44, No. 6, pp. 1910-1917, Nov./Dec. 2008.

[6]- K. Kurohane, A. Uehara, T. Senjyu, A. Yona, N. Urasaki, T. Funabashi, and C. Kim, “Control Strategy for a Distributed DC Power System with Renewable Energy,” Renewable Energy, vol. 36, No. 1, pp. 42–49, 2011.

[7]- E. Serban, and H. Serban, “A Control Strategy for a Distributed Power Generation Microgrid Application with Voltage and Current-Controlled Source Converter,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 25, No. 12, pp. 2981–2992, 2010.

[8]- H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, and R. Uchida, “DC Micro-Grid for Super High Quality Distribution—System Configuration and Control of Distributed Generations and Energy Storage Devices,” in Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf., Korea, pp. 3148–3154, Jun. 2006.

[9]-M. M. N. Amin, and O. A. Mohammed, “DC-bus voltage control technique for parallel-integrated permanent magnet wind generation systems,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 26, No. 4, pp. 1140–1150, 2011.

[10]- R. S. Balog, and P. T. Krein, “Bus Selection in Multibus DC Microgrids,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 26, No. 3, pp. 860–867, 2011.

[11]- J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, “Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization,” IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 58, No. 1, pp. 158–172, 2011.

[12]- T. K. Cheung, K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. S. Lee, and Y. L. Ho, “Application of ASK Modulation for DC/DC Converters Control in DC Distribution Power System,” in Proc. International Power Electronics Systems and Applications Conf., pp. 268–272, 2004.

[13]- N. R. Chaudhuri, and B. Chaudhuri, “Adaptive Droop Control for Effective Power Sharing in Multi-Terminal DC (MTDC) Grids,” IEEE Trans. Power Systems, vol. 28, No. 1, pp. 21–29, 2013.

[14]- S. Anand, B. G. Fernandes, and M. Guerrero, “Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 28, No. 4, pp. 1900–1913, 2013.

[15]- W. W. Weaver, and P. T. Krein, “Game-Theoretic Control of Small-Scale Power Systems,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 24, No. 3, pp. 1560-1567, Jul. 2009.

[16]- J. Chen, J. Chen, R. Chen, X. Zhang, and C. Gong, “Decoupling Control of the Non-Grid-Connected Wind Power System with the Droop Strategy Based on a DC Micro-Grid, ” World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conf., pp. 1-6, 2009.

[17]- W. Tang, and R. H. Lasseter, “An LVDC Industrial Power Distribution System without Central Control Unit,” IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conf., vol. 2, pp. 979-984, 2000.

[18]- P. Karlsson, and J. Svensson, “DC Bus Voltage Control for a Distributed Power System,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 18, pp. 1405-1412, 2003.

[19]- B. K. Johnson, R. H. Lasseter, F. L. Alvarado, and R. Adapa, “Expandable Multiterminal DC Systems Based on Voltage Droop,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, No. 4, pp. 1926-1932, 1993.

[20]- Y. Ito, Y. Zhongqing, and H. Akagi, “DC Microgrid Based Distribution Power Generation System,” in Proc. International Power Electronics and Motion Control Conf., China, vol. 3, pp. 1740–1745, Aug. 2004.

[21]- H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, “Distribution Voltage Control for DC Microgrids Using Fuzzy Control and Gain-Scheduling Technique,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 28, No. 5, pp. 2246–2258, 2013.

[22]- D. Chen, and L. Xu, “Autonomous DC Voltage Control of a DC Microgrid with Multiple Slack Terminals,” IEEE Trans. Power Systems, vol. 27, No. 4, pp. 1897–1905, 2012.

[23]- L. Xu, and D. Chen, “Control and Operation of a DC Microgrid with Variable Generation and Energy Storage,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 26, No. 4, pp. 2513–2522, 2011.

[24]- C. Jin, P. C. Loh, P. Wang, Y. Mi, and F. Blaabjerg, “Autonomous Operation of Hybrid AC-DC Microgrids,” IEEE International Sustainable Energy Technologies Conf., pp. 1–7, 2010.

[25]- Y. Miura, R. Sato, M. Saisho, and T. Ise, “DC Loop Type Superconducting Distribution System Including Various Distributed Generations,” IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 17, No. 2, pp. 2335–2338, 2007.

[26]- K. Sun, L. Zhang, Y. Xing, and J. M. Guerrero, “A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signalling for Modular Photovoltaic Generation Systems with Battery Energy Storage,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 26, No. 10, pp. 3032–3045, 2011.

[27]- X. Sun, Z. Lian, B. Wang, and X. Li, “A Hybrid Renewable DC Microgrid Voltage Control,” IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conf., pp. 725-729, 2009.

[28]- J. Schonberger, S. Round, and R. Duke, “Autonomous Load Shedding in a Nanogrid Using DC Bus Signalling,” IEEE 32nd Annual Industrial Electronics Conf., pp. 5155-5160, 2006.

[29]- J. Schonberger, R. Duke, and S. D. Round, “DC-Bus Signaling: a Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid,” IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 53, pp. 1453-1460, 2006.

[30]- J. Bryan, R. Duke, and S. Round, “Decentralized Generator Scheduling in a Nanogrid Using DC Bus Signaling,” IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 1, pp. 977-982,2004.