بهبود قابلیت گذر از خطای توربین بادی دارای ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در ریز شبکه

آرمان صفایی[1] ، سید حسین حسینیان[1] ، استاد ، حسین عسکریان ابیانه[1] ، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
askarian@aut.ac.ir

چکیده: استفاده از توربین‌های بادی دارای ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG) در شبکه‌های توزیع روزبروز در حال افزایش است. علاوه بر مزایای متنوع این نوع ژنراتورها مانند کنترل ساده و هزینه پایین و قابلیت کار در سرعت‌های مختلف باد، این نوع ژنراتورها به افت ولتاژ شبکه حساس بوده و در صورت بروز خطا در شبکه، جریان روتور افزایش یافته و می تواند منجر به آسیب مبدل‌های الکترونیک قدرت بکار رفته در آن شود. همچنین اضافه ولتاژ ناشی از خروج ناگهانی بار، ورود بانک خازنی و خطاهای نامتقارن نیز می‌تواند منجر به آسیب مبدل‌های بکار رفته در DFIG گردد. با توجه به لزوم رعایت الزامات شبکه، در این مقاله روش جدیدی برای بهبود قابلیت گذر از خطای DFIG شامل بهبود همزمان قابلیت گذر از افت ولتاژ (LVRT) و بهبود قابلیت گذر از اضافه ولتاژ (HVRT) با استفاده از ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا (SMES) و محدود کننده جریان خطای ابررسانا (SFCL) در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه ارائه شده است. شبیه سازی در نرم افزار PSCAD انجام شده و نتایج شبیه‌سازی کارایی روش پیشنهادی را در بهبود قابلیت گذر از خطای DFIG در هنگام بروز افت ولتاژ و اضافه ولتاژ در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی: ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG)، ریز شبکه (Microgrid)، قابلیت گذر از افت ولتاژ (LVRT)، قابلیت گذر از اضافه ولتاژ (HVRT)، ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا (SMES).

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۳/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول : حسین عسکریان ابیانه

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه صنعتی امیرکبیر- دانشکده مهندسی برق

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]

۱- مقدمه

با توجه به افزایش تقاضای انرژی، افزایش حساسیت‌ها نسبت به مسایل زیست محیطی، پیشرفت تکنولوژی‌های تولیدات پراکنده و بازار برق استفاده از تولیدات پراکنده رو به افزایش است [۱, ۲]. استفاده از باد به عنوان منبع پاک و رایگان تولید انرژی الکتریکی در حال گسترش روز افزون است و بر طبق پیش‌بینی‌ها تا سال ۲۰۲۰ میلادی ۱۰٪ کل برق جهان از انرژی باد استحصال خواهد شد [۳, ۴]. با افزایش نقش انرژی‌های تجدید پذیر در تولید انرژی و پیشرفت تکنولوژی‌های مرتبط با آن، ریز شبکه راه حل مناسبی به عنوان شبکه توزیع آینده می‌باشد.

یکی از پرکاربردترین انواع ژنراتورهای مورد استفاده در سیستم‌های بادی، ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (DFIG)[۱] است. ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه توانایی کارکرد در سرعت‌های زیر سنکرون و فوق سنکرون را دارد. مدار استاتور مستقیماً به شبکه متصل می‌شود در حالیکه سیم پیچ‌های روتور از طریق حلقه‌های لغزان و کانورترهای سه فاز AC/DC/AC به شبکه متصل می‌گردد [۵, ۶].

یکی از مهمترین معایب ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه، حساسیت آنها به بروز خطا در شبکه و افت ولتاژ ترمینال آن است. چنانچه شدت افت ولتاژ به حدی باشد که مبدل روتور نتواند ولتاژ لازم جهت کنترل جریان را فراهم کند و جریان القا شده در سیم‌پیچ روتور که ناشی از جریان استاتور است از مقدار مجاز جریان مبدا فراتر رود و یا سبب افزایش بیش از حد مجاز ولتاژ لینک DC شود، برای حفاظت از مبدل قرار گرفته در سمت روتور باید راهکاری در نظر گرفته شود. همچنین اضافه ولتاژ ناشی از خروج ناگهانی بار، انرژی دار شدن بانک خازنی و خطاهای نامتقارن ممکن است سبب آسیب مبدلهای بکار رفته در DFIG گردد. چرا که در صورت وقوع اضافه ولتاژ، نیروی محرک بزرگ ناشی از شار نشتی گذرای استاتور در روتور القا شده و منجر به جاری شدن جریان زیادی در آن می گردد [۷].

برای پرهیز از اثرات نامطلوب قطع توربین‌های باد در کشورهای دارای نفوذ بالا، تمام توربین‌های بادی جدید باید دارای قابلیت گذر از خطا باشند، به این معنی که توربین‌های بادی هنگام بروز خطا و افت ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) و همچنین بروز اضافه ولتاژ، باید در محدوده‌ی مشخصی متصل به شبکه باقی بمانند. بنابراین استفاده از روش‌های گذر از افت ولتاژ (LVRT)[۲] و گذر از اضافه ولتاژ (HVRT)[۳] ضروری است [۸].

روش‌های مختلفی جهت بهبود قابلیت گذر از افت ولتاژ DFIG ارائه شده است. روشی که به عنوان روش غالب در عملکرد پیوسته و بدون وقفه این ژنراتورها بکار گرفته می‌شود استفاده از مقاومت‌هایی موسوم به مقاومت‌های کروبار است. کروبار مجموعه‌ای از مقاومت‌هایی است که بصورت موازی با سیم‌پیچی روتور قرار می‌گیرند و به محض رویداد خطا و افزایش جریان روتور مبدل سمت روتور را از مدار خارج می‌کنند [۹, ۱۰]. هر چند استفاده از کروبار منجر به از دست رفتن کنترل DFIG هنگام بروز خطا می‌شود.

استفاده از ادوات FACTS[۴] برای بهبود قابلیت LVRT ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در مراجع [۱۱-۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است. در مقالات [۱۱] و [۱۲] از بازیابی کننده ولتاژ دینامیکی (DVR)[۵] برای جبران افت ولتاژ و بهبود LVRT استفاده شده است. همچنین در مرجع [۱۳] از STATCOM[۶] و جبران کننده توان راکتیو استاتیکی (SVC)[۷] برای جبران افت ولتاژ و بهبود LVRT استفاده شده است. هر چند روش های استفاده شده در این مقالات منجر به افزایش پیچیدگی کنترل، کاهش قابلیت اطمینان و افزایش هزینه خواهد شد.

کارایی استفاده از محدود کننده جریان خطا (FCL)[۸] برای افزایش قابلیت LVRT در مراجع [۱۴, ۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۱۴]، از محدود کننده ابررسانای جریان خطا (SFCL)[۹] و در مرجع [۱۵]، از محدود کننده نوع پل استفاده شده است.

در مطالعات قبلی، ساختارهای مختلفی از ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا (SMES)[۱۰] برای غلبه بر مشکلات شبکه، استفاده شده است. در [۱۶]، در روتور DFIG از کویل ابررسانا برای کاهش نوسانات ولتاژ و جریان هنگام بروز خطا استفاده شده است. در [۱۷]، برای کاهش نوسانات توان و ولتاژ توربین بادی از SMES سری و موازی استفاده شده است. از آنجاییکه استفاده از SMES در مراجع [۱۶, ۱۷]، تاثیری بر جبران افت ولتاژ DFIG هنگام بروز خطا در شبکه ندارد، قابلیت LVRT و HVRT را تضمین نمی‌کند.

علاوه بر روش‌های سخت افزاری که در بالا اشاره شد روش‌های کنترلی مختلفی جهت کنترل DFIG در شرایط خطا مانند روش کنترلی Current Tracking، روش کنترلی دمپ شار مجازی و روش کنترلی Sliding Mode ارائه شده است [۱۸-۲۰]. هر چند این روش‌های کنترلی، پیچیدگی کنترل سیستم را به دنبال دارند و در شرایط بروز خطاهای شدید کارایی خود را از دست می‌دهند.

در مطالعات انجام شده قبلی، تمرکز اصلی بر بهبود قابلیت LVRT ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در شبکه های عادی بوده و بهبود LVRT در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه کمتر مورد توجه قرار گرفته-است. همچنین در اکثر مطالعات انجام شده، تنها تاثیر افت ولتاژ بر روی عملکرد DFIG و بهبود قابلیت LVRT بررسی شده و مطالعات کمی بر روی تاثیر اضافه ولتاژ بر عملکرد DFIG و در نتیجه بهبود HVRT انجام شده است.

در این مقاله روش جدیدی برای بهبود همزمان قابلیت LVRT و HVRT ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه با استفاده از ذخیره ساز مغناطیسی ابررسانا و محدود کننده جریان خطای ابررسانا پیشنهاد شده است. برای بررسی دقیق عملکرد روش پیشنهاد شده بر بهبود قابلیت LVRT و HVRT ژنراتور القایی تغذیه دوگانه از نرم افزار PSCAD استفاده شده است. نتایج شبیه سازی، کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

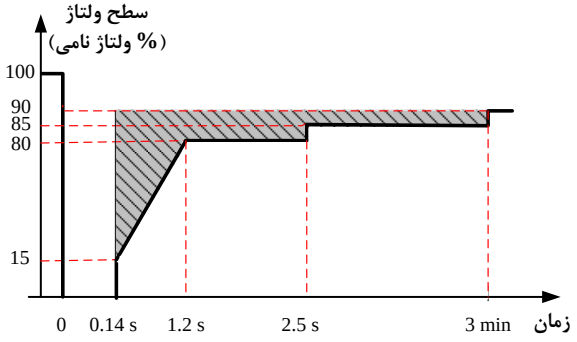
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]

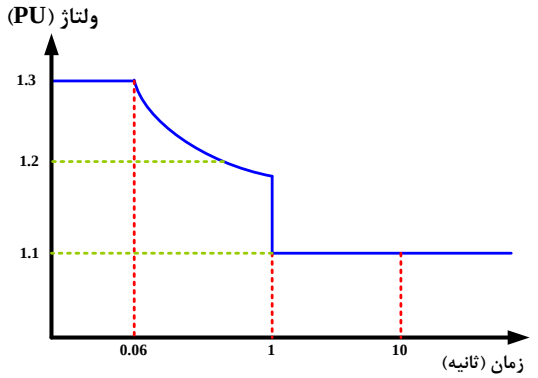
۲- شرح مشکل

قابلیت‌های LVRT و HVRT توربین های بادی تعیین کننده نحوه قطع آنها هنگام برزو خطا در شبکه است. شکل (۱)، الزامات شبکه کشور انگلستان برای قابلیت LVRT را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، توربین بادی در ناحیه هاشور زده شده باید متصل به شبکه بماند و توان راکتیو به شبکه تزریق کند. در صورتیکه ولتاژ ترمینال توربین بادی پایینتر از خطوط پیوسته شکل (۱)، باشد، توربین بادی باید از شبکه قطع گردد. به عبارت دیگر اگر ولتاژ ترمینال توربین بادی به ۰٪ مقدار نامی‌اش برسد، توربین بادی باید ۰.۱۴ ثانیه متصل به شبکه باقی بماند و اگر ولتاژ ترمینال توربین بادی به ۸۰٪ مقدار نامی‌اش برسد، توربین بادی باید ۲.۵ ثانیه متصل به شبکه باقی بماند [۲۱].

در سال‌های اخیر، الزامات شبکه برخی از کشورها مانند استرالیا، اسپانیا، دانمارک و آمریکا، مشخصه ولتاژ-زمان جدیدی را برای شرایط اضافه ولتاژ اجباری نموده‌اند. اضافه ولتاژ در شبکه می‌تواند با قطع بار بزرگی از شبکه و یا بروز خطاهای نامتقارن در شبکه با زمان و اندازه مختلف ایجاد گردد. این نیازمندی قابلیت گذر از اضافه ولتاژ (HVRT) نامیده می‌شود. شکل (۲)، نمودار قابلیت HVRT کشور استرالیا را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، اضافه ولتاژ قابل قبول برای ترمینال توربین بادی برابر ۱.۳ پریونیت و به مدت ۰.۰۶ ثانیه می‌باشد. به‌عبارت



شکل (۱): نمودار قابلیت گذر از افت ولتاژ (LVRT) انگلستان [۲۱].



شکل (۲): نمودار قابلیت گذر از اضافه ولتاژ (HVRT) استرالیا [۲۲].

دیگر توربین بادی در صورت وقوع اضافه ولتاژ در شبکه باید زیر خط پیوسته نمودار، متصل به شبکه باقی بماند [۲۲].

همانطور که بیان شد، توربین‌های بادی باید در شرایط خطا و بروز افت ولتاژ و اضافه ولتاژ مطابق نمودارهای قابلیت LVRT و HVRT، متصل به شبکه باقی بمانند. از طرفی توربین‌های بادی دارای ژنراتور DFIG به خطاهای شبکه و تغییرات ولتاژ حساس هستند. افت ولتاژ در ترمینال DFIG، منجر به عبور جریان زیادی از روتور شده و در صورتیکه حفاظت مناسبی در نظر گرفته نشده باشد، این امر می‌تواند آسیب مبدل‌های الکترونیک قدرت بکار رفته در آن را به دنبال داشته باشد.

همچنین اضافه ولتاژ ناشی از قطع ناگهانی بارهای بزرگ، خطاهای نامتقارن در شبکه و ورود بانک خازنی به شبکه، نیز می‌تواند به مبدل‌های الکترونیک قدرت بکار رفته در DFIG آسیب وارد کند. هنگامیکه اضافه ولتاژی رخ می‌دهد، نیروی الکترومغناطیسی بزرگی ناشی از شار نشتی گذرای استاتور به روتور DFIG القا شده و در نتیجه اضافه جریانی در روتور ایجاد خواهد کرد [۸, ۲۳].

در گذشته برای حفاظت DFIG، هنگام بروز خطا در شبکه، توربین‌های بادی از شبکه قطع می‌گردیدند. با توجه به ضریب نفوذ بالای توربین‌های بادی امروزه قطع آنها از شبکه منجر به از دست رفتن پایداری شده و تاثیرات بدی را به دنبال دارد. بنابراین امروزه توربین‌های بادی باید در شرایط خطا متصل به شبکه باقی مانده و شبکه را حمایت کنند. بنابراین استفاده از روش‌های افزایش قابلیت LVRT و HVRT برای توربین‌های بادی دارای DFIG ضروری است.

در بیشتر مطالعات انجام شده، تمرکز بر افزایش قابلیت LVRT در شبکه‌های توزیع برق معمولی بوده است. بنابراین تحقیقاتی بر روی افزایش قابلیت LVRT در ریز شبکه‌ها انجام نگرفته است. همچنین در مطالعات صورت گرفته تنها بررسی تاثیرات افت ولتاژ شبکه بر عملکرد DFIG و افزایش قابلیت LVRT مورد توجه بوده است و توجه کمی به بررسی تاثیرات اضافه ولتاژ شبکه بر DFIG و افزایش قابلیت HVRT توربین‌های بادی شده است. با توجه به نکات گفته شده، بهبود همزمان قابلیت LVRT و HVRT توربین‌های بادی دارای DFIG در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه بحثی ضروری است که مطالعات کمی تا کنون در این زمینه انجام شده است.

در این مقاله روش جدیدی برای بهبود همزمان قابلیت گذر از افت ولتاژ (LVRT) و قابلیت گذر از اضافه ولتاژ (HVRT) در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه ارائه شده است. در روش پیشنهادی از ذخیره‌ساز مغناطیسی ابررسانا (SMES) و محدود کننده جریان خطای ابررسانا (SFCL)، استفاده شده است. در این مقاله تاثیرات SMES و SFCL بر روی عملکرد DFIG در شرایط خطا در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی کارآمدی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]

۳- ژنراتور القایی تغذیه دوگانه(DFIG)

امروزه پرکاربردترین ژنراتور جهت تولید برق از انرژی بادی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه می‌باشد. این ژنراتورها قابلیت کار با سرعت متغیر را فراهم می‌کنند و مبدل‌های بکار رفته در آن با درصد کمی از توان نامی توربین سروکار دارند. همانطور که در شکل (۳)، نشان داده شده است، در این ژنراتورها از مبدل‌های پشت به پشت AC/DC/AC استفاده می‌شود. مبدل AC/DC/AC که بین سیم پیچ‌های روتور و شبکه قرار گرفته از دو مبدل منبع ولتاژ (VSC)[۱۱]، مبدل سمت روتور (RSC)[۱۲] و مبدل سمت شبکه (GSC)[۱۳] که به صورت پشت به پشت به یکدیگر متصل‌اند، تشکیل شده است. بین دو مبدل جهت برطرف کردن ریپل ولتاژ و همچنین به منظور ذخیره انرژی از یک خازن استفاده می‌شود. مبدل سمت روتور کنترل گشتاور شفت، سرعت ژنراتور القایی تغذیه دوگانه و همچنین ضریب قدرت در پایانه استاتور را فراهم می‌سازد. از مبدل سمت شبکه نیز برای ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC صرفنظر از اندازه و جهت توان روتور استفاده می‌شود. آرایش پشت به پشت مبدل‌ها باعث می‌شود که ولتاژ و فرکانس متغیر خروجی سیم پیچ‌های روتور به ولتاژ و فرکانس ثابت و سازگار با شبکه تبدیل شود. مبدل‌های سمت شبکه و روتور با روابط زیر مدل می‌شوند:

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = w_b.(R_s.i_{ds} + w_e.\lambda_{qs} + v_{ds}) \quad (۱)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = w_b.(R_s.i_{qs} + w_e.\lambda_{ds} + v_{qs}) \quad (۲)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = w_b.(R_s.i_{qs} + w_e.\lambda_{ds} + v_{qs}) \quad (۳)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} = w_b.(R_r.i_{qr} + w_e.\lambda_{dr} + v_{qr}) \quad (۴)$$

در روابط بالا منظور از λ شار پیوندی، w_b سرعت زاویه‌ای پایه و w_e سرعت زاویه‌ای الکتریکی استاتور می‌باشد [۲۴]. در حالت دائم برای یک توربین در سرعت ثابت و سیستم DFIG بدون تلفات خواهیم داشت:

$$P_m = P_s + P_r \quad (۵)$$

$$P_r = P_m - P_s = T_m.w_r - T_m.w_s = -T_m(\frac{w_s - w_r}{w_s})w_s = -s.T_m.w_s = -s.P_s \quad (۶)$$

$$P_s = \frac{P_m}{1-s}$$
$$P_r = -s\frac{P_m}{1-s} \quad (۷)$$

منظور از S در معادلات بالا لغزش می‌باشد [۲۵].

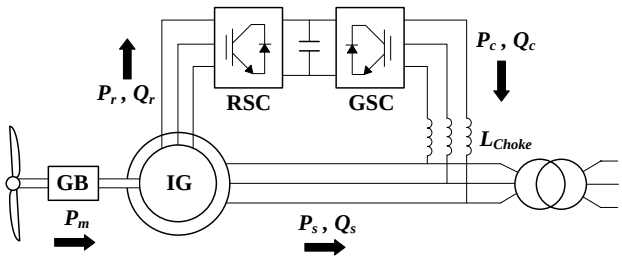
در این مقاله برای کنترل کروبار از روش ارائه شده در مرجع [۲۶] استفاده شده است. در این روش کنترلی میزان جریان روتور با مقادیر از پیش تنظیم شده‌ی I_L و I_H مقایسه می‌گردد. در صورتیکه جریان روتور از مقدار I_H بیشتر شود، کروبار عمل خواهد کرد و با کاهش جریان روتور به مقدار کمتر از I_L، کروبار غیر فعال خواهد شد. در این مقاله مقادیر I_L و I_H به ترتیب برابر ۱/۹ و ۲ پریونیت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است استفاده از این روش کنترلی کاهش زمان عملکرد کروبار و در نتیجه افزایش پایداری DFIG در شرایط خطا را به دنبال دارد.

۴- مدل ذخیره‌ساز مغناطیسی ابررسانا (SMES) و محدود کننده جریان خطای ابررسانا (SFCL)

SMES، وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را در میدان مغناطیسی ذخیره می‌کند. جریان DC عبوری از سیم‌پیچ ابررسانا، میدان مغناطیسی را تولید می‌کند. از آنجاییکه انرژی بصورت جریان در حال گردش ذخیره می‌شود، SMES سرعت پاسخدهی بالایی دارد.

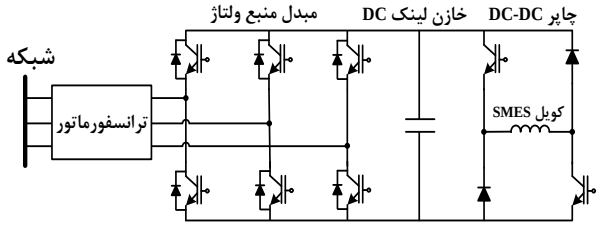
SMES در مقایسه با سایر ذخیره‌سازهای انرژی دارای مزایایی مانند طول عمر بالا به دلیل نداشتن قسمت مکانیکی، سرعت پاسخدهی بالا و بازده بالا می‌باشد. SMES می‌تواند با توجه به وضعیت شبکه، توان اکتیو و راکتیو را جذب کرده (حالت شارژ) و یا به شبکه تزریق نماید (حالت دشارژ). بنابراین SMES برای کاربردهای انرژی بادی مناسب می‌باشد.

روشهای مختلفی برای کنترل SMES ارائه شده است [۲۷]. همانطور که در شکل (۴) مشخص است، در این مقاله از SMES با مبدل منبع ولتاژ PWM[۱۴] و چاپر DC-DC برای کنترل همزمان توان اکتیو و



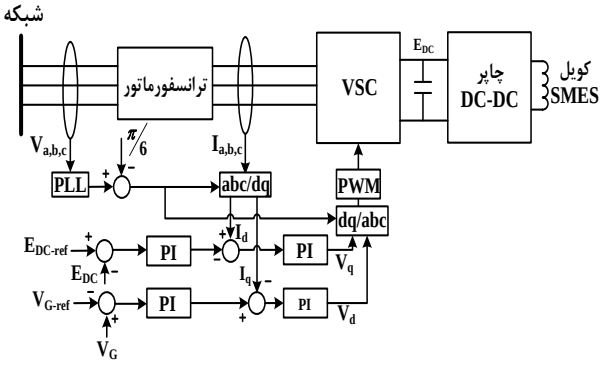
RSC: کانورتر سمت روتور **GSC:** کانورتر سمت شبکه
GB: گیربکس **IG:** ژنراتور القایی

شکل (۳): توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه [۲۴].

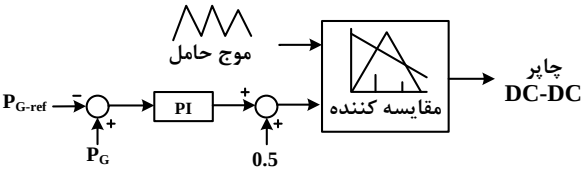


شکل (۴): ساختار SMES [۲۷].

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]



شکل (۵): سیستم کنترل مبدل منبع ولتاژ SMES [۲۸].



شکل (۶): سیستم کنترل چاپر DC [۲۸].

راکتیو استفاده شده است. SMES شامل یک ترانسفورماتور، یک مبدل منبع ولتاژ PWM ۶ پالسه، یک خازن لینک DC، یک چاپر DC دو ربعی و یک اندوکتانس به عنوان کویل ابررسانا می‌باشد.

کنترل SMES بر اساس مرجع [۲۸] می‌باشد. سیستم کنترلی مبدل منبع ولتاژ در شکل (۵)، نشان داده شده است. کنترل کننده های تناسبی-انتگرالی (PI)[۱۵] برای تعیین جریان‌های مرجع محور d و محور q با استفاده از تفاوت بین ولتاژ لینک DC و ولتاژ مرجع و تفاوت بین ولتاژ ترمینال و ولتاژ مرجع استفاده شده اند. سیگنال مرجع مبدل منبع ولتاژ با تبدیل ولتاژ محور d و q که توسط اختلاف بین جریان مرجع محور d و q با جریان اندازه‌گیری شده بدست آمده، تولید می‌شود. سیگنال PWM برای کلیدهای IGBT[۱۶] از مقایسه سیگنال مرجع با سیگنال حامل مثلثی تولید می‌شود. وظیفه مبدل منبع ولتاژ ۶ پالسه، ثابت نگهداشتن ولتاژ لینک DC است.

چاپر DC که برای شارژ نمودن و یا دشارژ نمودن کویل ابررسانا مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای تولید ولتاژ منفی و یا مثبت برای کویل ابررسانا به منظور روشن و یا خاموش نمودن کلیدهای مورد استفاده در چاپر، کنترل می‌شود. بنابراین کویل ابررسانا با تنظیم ولتاژ متوسط دو سر کویل که توسط کنترل کننده PI تولید می‌شود، شارژ و یا دشارژ می‌گردد. سیستم کنترلی شارژ و دشارژ SMES در شکل (۶)، نشان داده شده است.

ظرفیت SMES به کاربرد آن و مدت زمان شارژ و دشارژ بستگی دارد. SMES با ظرفیت انرژی بالاتر، تاثیرات مطلوب‌تری بر کاهش نوسانات و در نتیجه بهبود بیشتر قابلیت LVRT و HVRT ژنراتور القایی تغذیه دوگانه خواهد داشت اما قیمت آن نیز با توجه به عبور جریان بالا از کویل بیشتر می‌باشد. اگر ظرفیت انرژی SMES خیلی پایین باشد، خروجی SMES هنگام خطا در شبکه محدود شده و کارایی مناسبی نخواهد داشت. بنابراین در این مقاله با توجه به مسایل اقتصادی و فنی ظرفیت SMES برابر ۱ مگاژول در نظر گرفته شده است که ظرفیت مناسبی برای ریز شبکه شبیه سازی شده با توجه به میزان بار و تولید آن است.

در میان انواع مختلف محدود کننده‌های جریان خطا (FCL)، محدود کننده جریان خطای ابررسانا (SFCL) به دلیل عملکرد سریع و محدود نمودن جریان خطا در چند میلی ثانیه در مقایسه با سایر محدود کننده‌ها کاربرد بیشتری پیدا کرده است. SFCLها به دو نوع مقاومتی (R-SFCL) و سلفی (X-SFCL) تقسیم بندی می‌شوند [۲۹]. در این مقاله از مدل حرارتی SFCL مقاومتی جهت شبیه سازی استفاده شده است. SFCL مقاومتی دارای مقاومت محدود کننده غیر خطی می‌باشند که دلیل این امر مشخصه میدان الکتریکی- چگالی جریان ($E \sim J$) آن می‌باشد. با بروز خطا و افزایش دمای SFCL بعد از چند میلی ثانیه مقاومت SFCL افزایش یافته و بعد از چند سیکل به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد [۳۰, ۳۱].

در این مقاله از مدل حرارتی SFCL بر اساس مرجع [۳۱]، استفاده شده است. SFCL مقاومتی با استفاده از روابط زیر مدلسازی شده است:

$$E(J,T) = E_c \left(\frac{J}{J_c}\right)^{n(T)} \qquad (۸)$$

$$C\frac{dT}{dt} = E(J,T).J(t) \qquad (۹)$$

که در روابط بالا E_c میدان الکتریکی بحرانی، J_c چگالی جریان بحرانی، n تابعی از دما که بین ۵ تا ۱۵ تغییر میکند و C ظرفیت گرمایی بر حجم است.

میزان مقاومت SFCL نیز تاثیر مستقیمی در کارایی روش ارائه شده دارد. با افزایش مقاومت SFCL، در شرایط خطا میزان افت ولتاژ کاهش یافته که این امر منجر به بهبود بیشتر قابلیت LVRT می‌گردد. هر چند انتخاب SFCL با مقاومت بالاتر افزایش هزینه و تلفات را به دنبال خواهد داشت. بر عکس، اگر مقدار مقاومت SFCL خیلی کم انتخاب شود، SFCL تاثیر مناسبی بر کاهش جریان خطا و کاهش افت ولتاژ به وجود آمده در شرایط خطا و در نتیجه بهبود قابلیت LVRT نخواهد داشت. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی‌های متعدد، حداقل میزان مقاومت SFCL که منجر به عملکرد مناسب آن در شرایط خطا در ریز شبکه مورد مطالعه می‌گردد، برابر ۳۰ اهم انتخاب شده است.

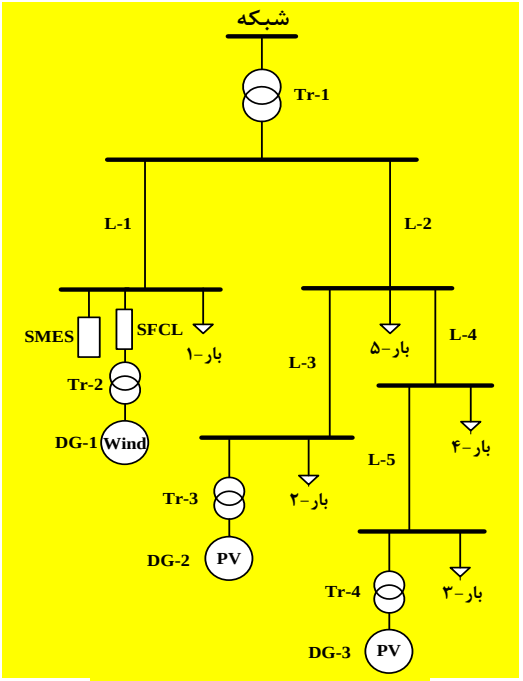
۵- نتایج شبیه سازی

برای ارزیابی و بررسی کارآمدی استفاده از SMES و SFCL به منظور بهبود همزمان قابلیت LVRT و HVRT توربین بادی دارای DFIG، ریز شبکه استفاده شده در مرجع [۳۲]، مدلسازی شده است. همانطور

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]

که در شکل (۷)، مشخص است، این ریز شبکه دارای یک توربین بادی، یک سیستم فتوولتاییک و یک ژنراتور سنکرون و می‌باشد. ولتاژ ریز شبکه ۲۵ کیلوولت بوده و اطلاعات مربوط به آن در جدول (۱)، آمده است. شبیه سازی برای دو حالت افت ولتاژ و اضافه ولتاژ در حالت متصل به شبکه انجام شده است.



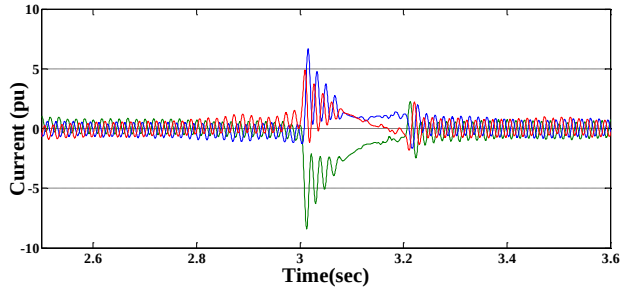
شکل (۷): ریز شبکه شبیه سازی شده

جدول (۱): اطلاعات مربوط به ریز شبکه

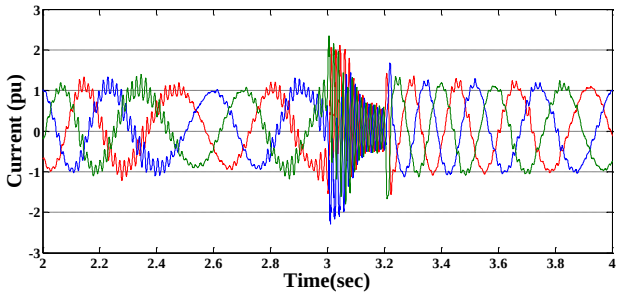
پارامتر ریز شبکه	مقدار
Tr-1	۱۲۰-۲۵ kV, ۲۰ MVA
Tr-2	۰.۶۹-۲۵ kV, ۲ MVA
Tr-3	۵.۷۵-۲۵ kV, ۲ MVA
Tr-4	۰.۲۳-۲۵ kV, ۲ MVA
فرکانس	۶۰ هرتز
DG-1	۱ MW
DG-2	۱ MW
DG-3	۱ MW
بار-۱	۲ MW
بار ۲ و ۳	۱.۵ MW
بار ۴و۵	۱ MW
خطوط (طول هر خط ۲۰ Km)	R=۰.۴۱۳ Ω/km, L= ۳.۳۲e-۳ H/km,

۵-۱- بروز افت ولتاژ

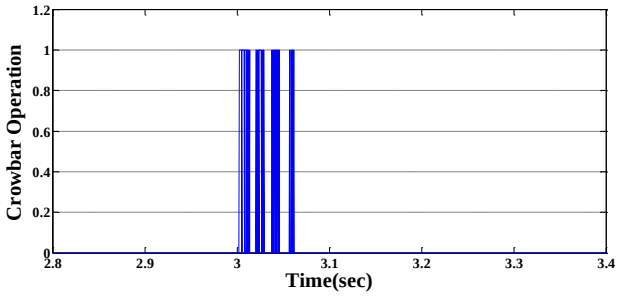
در این حالت جهت بررسی عملکرد DFIG در شرایط افت ولتاژ، اتصال کوتاه سه فازی در زمان ۳ ثانیه به مدت ۰.۲ ثانیه به ترمینال DFIG اعمال شده است. شکل (۸)، نتایج شبیه سازی را در حالت بدون استفاده از SFCL و SMES، نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۸-الف) و (۸-ب) مشخص است، با وقوع اتصال کوتاه، جریان استاتور و روتور افزایش یافته که این امر می‌تواند منجر به آسیب مبدلهای بکار رفته در DFIG گردد. شکل (۸-ج)، تعداد عملکرد کروبار را نشان می‌دهد. با بروز خطا در این حالت تعداد عملکرد کروبار برابر ۵۴ می‌باشد که این منجر به بین رفتن کنترل DFIG می‌گردد.



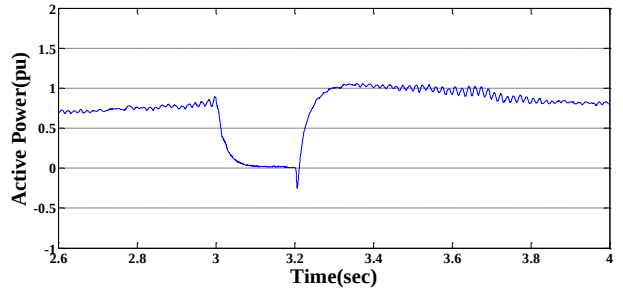
الف)



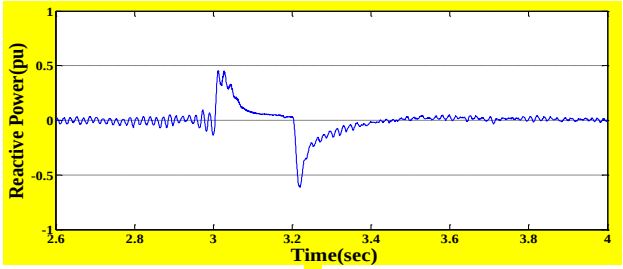
ب)



ج)



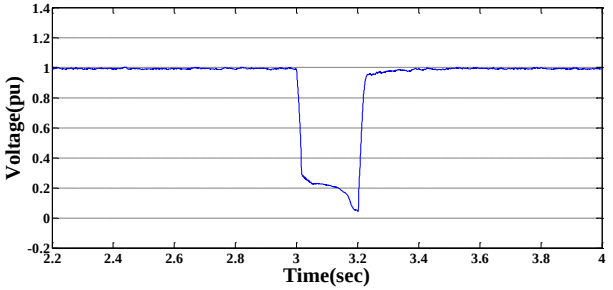
د)



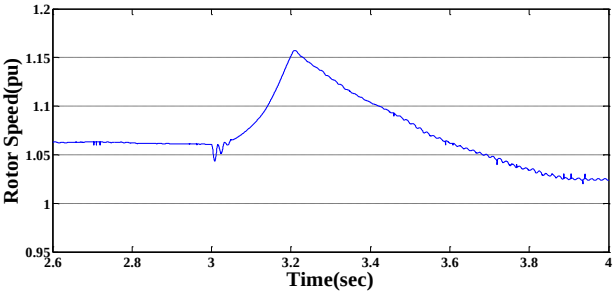
ه)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]



و)



ز)

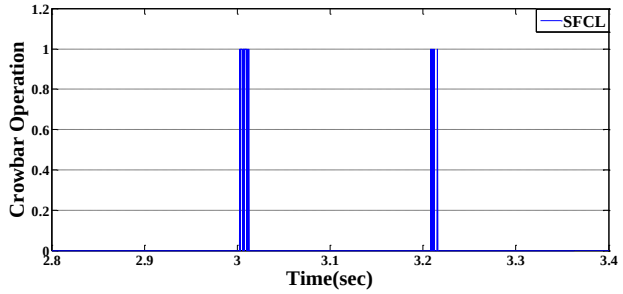
شکل (۸): پاسخ DFIG به بروز خطای سه فاز بدون SFCL و SMES : الف) جریان استاتور، ب) جریان روتور، ج) عملکرد کروبار، د) توان اکتیو، ه) توان راکتیو، و) ولتاژ، ز) سرعت روتور

شکل (۸-د) و (۸-ه)، به ترتیب توان اکتیو و راکتیو DFIG را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، با بروز اتصال کوتاه توان اکتیو خروجی DFIG صفر می‌شود. همچنین به علت عملکرد مداوم کروبار هنگام رفع خطا، توان راکتیوی برابر با ۰.۶ پریونیت توسط DFIG جذب می‌گردد که منجر به افت ولتاژ بعد از رفع خطا می‌گردد. شکل (۸-و)، ولتاژ ترمینال DFIG را نشان می‌دهد. با بروز اتصال کوتاه سه فاز، ولتاژ DFIG کاهش یافته و به ۰.۰۵ پریونیت می‌رسد. شکل (۸-ز)، سرعت روتور را هنگام بروز خطا نشان می‌دهد. مطابق این شکل، هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز سرعت روتور افزایش یافته و به ۱.۱۶ پریونیت می‌رسد.

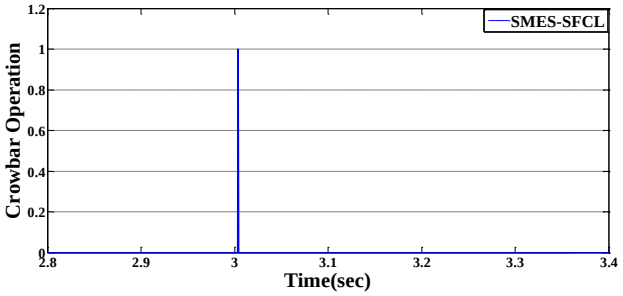
بنابراین با توجه به نتایج، مشخص است که با بروز اتصال کوتاه سه فاز بدون در نظر گرفتن روش مناسبی جهت بهبود قابلیت LVRT، جریان روتور و استاتور DFIG افزایش یافته که می‌تواند منجر به آسیب مبدل‌های بکار رفته در آن گردد.

در این مقاله برای افزایش قابلیت LVRT در DFIG هنگام بروز اتصال کوتاه در ریز شبکه، استفاده از SFCL و SMES پیشنهاد شده است. میزان انرژی SMES برابر ۱ مگا ژول و میزان مقاومت SFCL برابر ۳۰ اهم در نظر گرفته شده است. همانطور که بیان شد، در این مقاله از مدل حرارتی SFCL برای شبیه سازی استفاده شده است تا دقت شبیه سازی افزایش یابد. در شکل (۹)، نتایج شبیه سازی در دوحالت استفاده از SFCL به صورت مجزا و همچنین استفاده از SFCL و SMES بطور همزمان (SMES-SFCL) با یکدیگر مقایسه شده است.

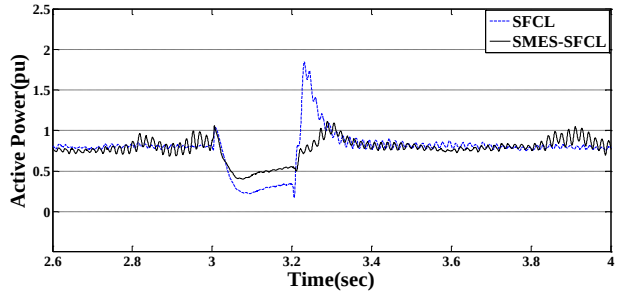
شکل (۹-الف) و شکل (۹-ب)، تعداد عملکرد کروبار در دو حالت استفاده از SFCL و SMES-SFCL را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در صورت استفاده از SMES-SFCL، تعداد عملکرد



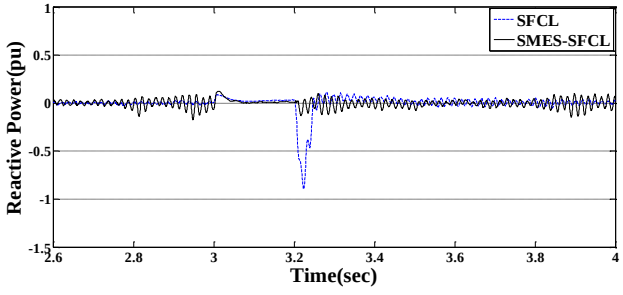
الف)



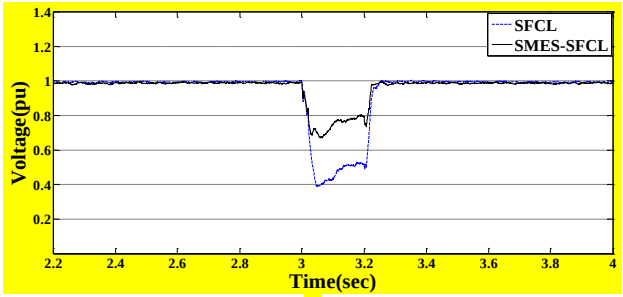
ب)



ج)



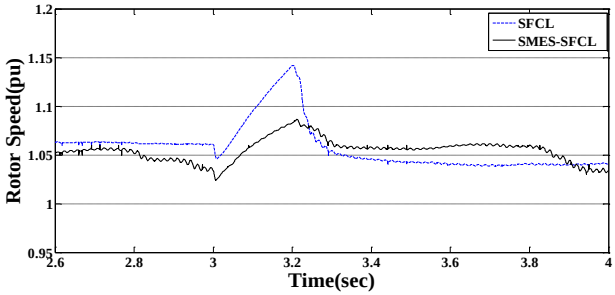
د)



ه)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]



و)

شکل (۹): پاسخ DFIG به بروز خطای سه فاز با SFCL و SMES-SFCL : الف) عملکرد کروبار با SFCL، ب) عملکرد کروبار با SMES-SFCL ، ج) توان اکتیو، د) توان راکتیو، ه) ولتاژ، و) سرعت روتور

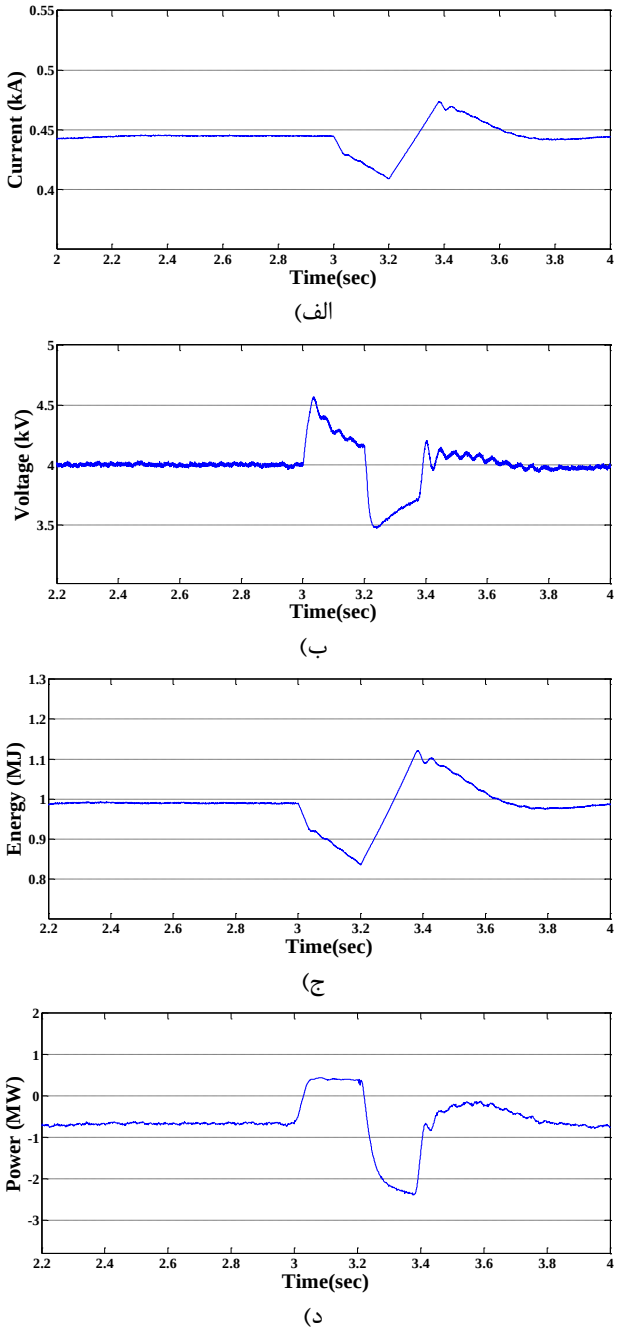
کروبار از ۲۳ به ۴ کاهش می‌یابد که این منجر به بهبود قابلیت LVRT در DFIG خواهد شد چرا که کنترل‌پذیری هنگام شرایط خطا در این حالت افزایش می‌یابد. شکل (۹-ج)، توان اکتیو DFIG را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که در صورت استفاده از SMES-SFCL ، هنگام بروز خطا، توان اکتیو توسط SMES به شبکه تزریق شده و منجر به افزایش توان DFIG هنگام بروز خطا می‌شود. شکل (۹-د)، توان راکتیو DFIG را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در صورت استفاده از SMES-SFCL ، بعد از رفع خطا توان راکتیو توسط SMES به شبکه تزریق شده و در نتیجه توان راکتیو جذب شده توسط DFIG از ۰.۸ پریونیت به ۰.۱ پریونیت کاهش می‌یابد که بازیابی سریعتر ولتاژ بعد از رفع خطا را به دنبال دارد که طبیعتا قابلیت LVRT را افزایش خواهد داد.

شکل (۹-ه)، ولتاژ ترمینال DFIG را در دو حالت استفاده از SFCL و استفاده از SMES-SFCL را نشان می‌دهد. در صورت استفاده از SMES-SFCL، هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز، افت ولتاژ ایجاد شده کاهش یافته و مقدار ولتاژ از ۰.۴ پریونیت به ۰.۷ پریونیت می‌رسد که دلیل آن تزریق توان راکتیو توسط SMES می‌باشد.

شکل (۹-و)، سرعت روتور DFIG را در دو حالت استفاده از SFCL و SMES-SFCL نشان می‌دهد. در حالت استفاده از SMES-SFCL افزایش سرعت روتور از ۱.۱۴ پریونیت به ۱.۰۸ پریونیت محدود می‌گردد که نشان دهنده افزایش پایداری DFIG در صورت استفاده از SMES است.

با توجه به نتایج شبیه سازی مشخص است که استفاده از SMES به همراه SFCL منجر به کاهش تعداد عملکرد کروبار، کاهش افت توان اکتیو DFIG، کاهش توان راکتیو جذب شده، کاهش افت ولتاژ و کاهش اورشوت سرعت روتور DFIG و افزایش پایداری هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز شده که نشان دهنده بهبود قابلیت LVRT در DFIG است. بنابراین استفاده از SMES روش موثری برای افزایش قابلیت LVRT در DFIG در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه می‌باشد که نتایج شبیه سازی کارایی این روش را اثبات می‌کنند.

شکل (۱۰)، عملکرد SMES هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز در ریز



شکل (۱۰): پاسخ SMES به بروز خطای سه فاز: الف) جریان، ب) ولتاژ DC ، ج) انرژی، د) توان اکتیو

شبکه را نشان می‌دهد. قبل از بروز خطا، جریان SMES در مقدار نامی خود ثابت بوده و SMES در حالت آماده به کار است و انرژی‌ای به ریز شبکه تزریق یا از آن دریافت نمی‌کند و ماکزیمم انرژی که برابر ۱ مگاژول است در SMES ذخیره شده است.

با بروز خطا در ثانیه ۳، جریان SMES کاهش می‌یابد. بنابراین در این حالت SMES وارد حالت دشارژ شده و انرژی ذخیره شده در آن به ریز شبکه تزریق می‌گردد. به محض بر طرف شدن اتصال کوتاه در زمان ۳.۲ ثانیه، SMES وارد حالت شارژ شده و جریان آن افزایش

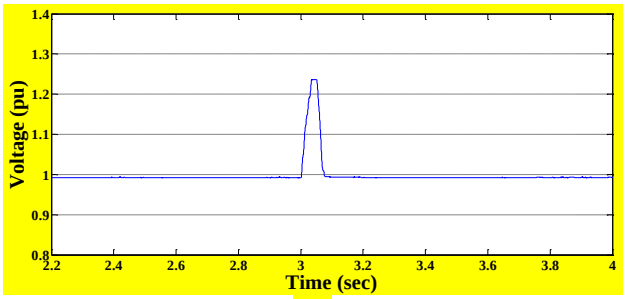
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]

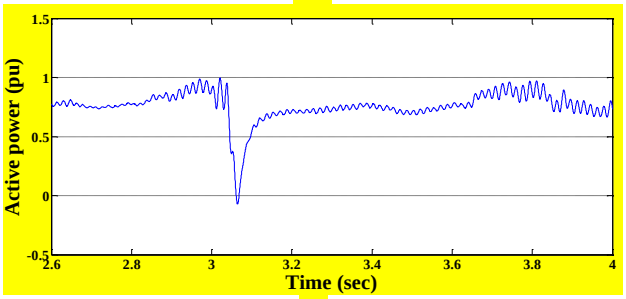
می‌یابد تا جاییکه انرژی ذخیره شده در آن به مقدار نامی ۱ مگاژول برسد. بنابراین SMES با تزریق انرژی به ریز شبکه هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز، نقش مهمی در بهبود قابلیت LVRT در DFIG دارد.

۵-۲- بروز اضافه ولتاژ

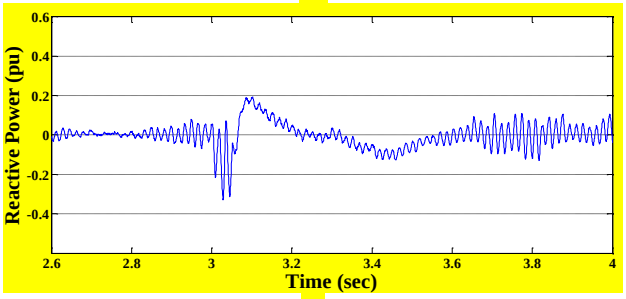
در این قسمت جهت بررسی کارایی استفاده از SMES در بهبود قابلیت HVRT ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه در شرایط بروز اضافه ولتاژ، اضافه ولتاژی به مقدار ۱.۲۵ پریونیت در ثانیه ۳ به مدت ۰.۰۵ ثانیه به ریز شبکه اعمال شده



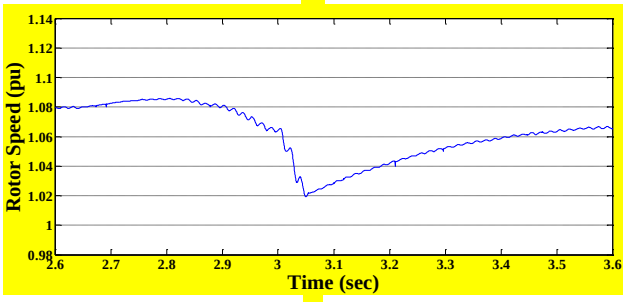
الف)



ب)



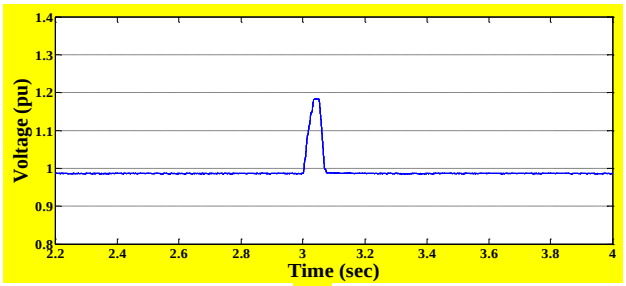
ج)



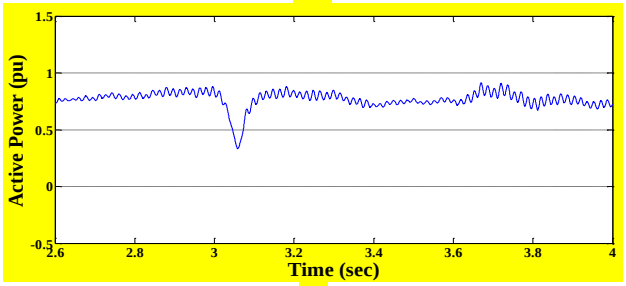
د)

شکل (۱۱): پاسخ DFIG به بروز اضافه ولتاژ بدون SMES: الف) ولتاژ، ب) توان اکتیو، ج) توان راکتیو، د) سرعت روتور

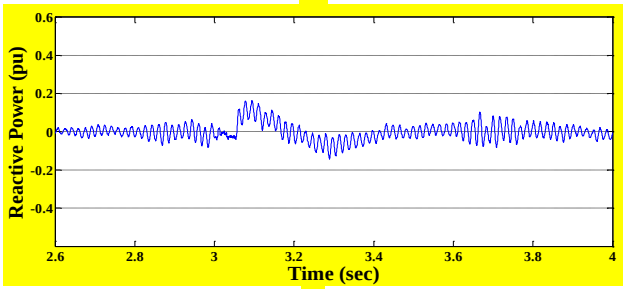
است. شکل (۱۱) عملکرد DFIG را بدون استفاده از SMES نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است با بروز اضافه ولتاژ در ثانیه ۳، توان اکتیو DFIG صفر می‌شود (شکل (۱۱-ب)). همچنین مطابق شکل (۱۱-ج)، با بروز اضافه ولتاژ توان راکتیوی به میزان ۰.۳ پریونیت توسط DFIG جذب می‌گردد که افت ولتاژ در ریز شبکه را به دنبال خواهد داشت. همچنین سرعت روتور DFIG نیز از مقدار ۱.۰۸ پریونیت به ۱.۰۲ پریونیت کاهش می‌یابد (شکل (۱۱-د)). بنابراین در حالت بروز اضافه ولتاژ، اگر روش مناسبی برای بهبود قابلیت HVRT در نظر گرفته نشود، از دست رفتن کنترل DFIG و آسیب آن و همچنین عدم ارضای الزامات شبکه را به دنبال دارد.



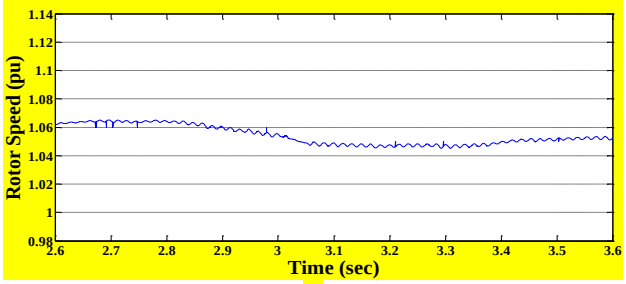
الف)



ب)



ج)



د)

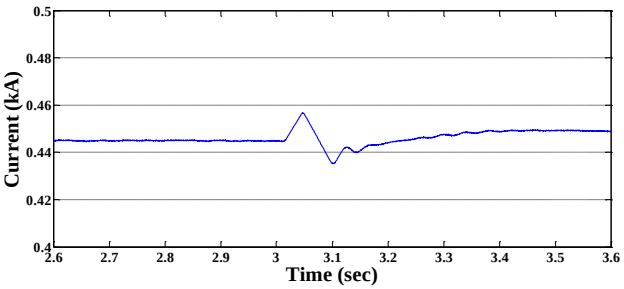
شکل (۱۲): پاسخ DFIG به بروز اضافه ولتاژ با SMES: الف) ولتاژ، ب) توان اکتیو، ج) توان راکتیو، د) سرعت روتور

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

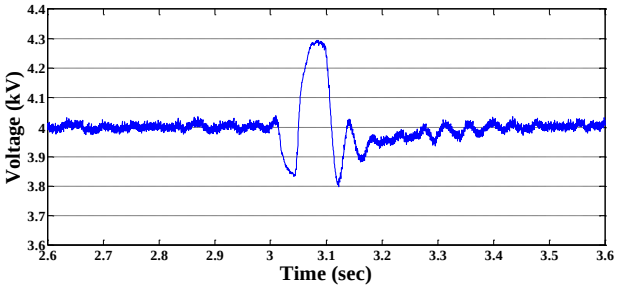
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]

شکل (۱۲)، عملکرد DFIG را هنگام بروز اضافه ولتاژ با استفاده از SMES را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۱۲-الف)، در حضور SMES میزان افزایش ولتاژ از ۱.۲۵ پریونیت به ۱.۱۸ پریونیت کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۲-ب)، مشخص است، با استفاده از SMES توان اکتیو DFIG هنگام بروز افت ولتاژ از صفر به ۰.۳۵ پریونیت افزایش می‌یابد که دلیل آن، جذب انرژی از ریز شبکه توسط SMES است. همچنین مطابق شکل (۱۲-ج)، با بروز اضافه ولتاژ توان راکتیو جذب شده به ۰.۱ پریونیت کاهش می‌یابد. همچنین نوسان سرعت روتور DFIG نیز در صورت بروز اضافه ولتاژ کاهش می‌یابد (شکل (۱۲-د)). بنابراین نتایج نشان می‌دهد، استفاده از SMES منجر به افزایش قابلیت HVRT در DFIG هنگام بروز اضافه ولتاژ می‌گردد.

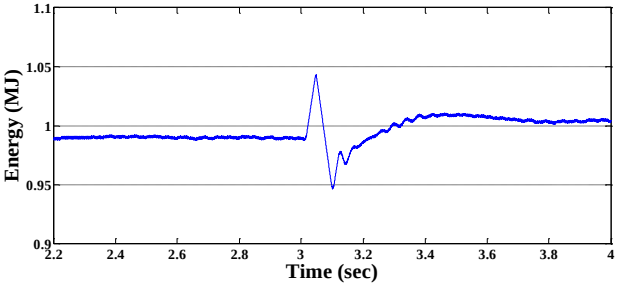
به محض بر طرف شدن اضافه ولتاژ، جریان SMES کاهش یافته و SMES وارد حالت دشارژ شده و انرژی خود را به ریز شبکه تزریق می‌کند تا جاییکه انرژی ذخیره شده در آن به مقدار نامی ۱ مگاژول برسد. بنابراین SMES با جذب انرژی از ریز شبکه هنگام بروز اضافه ولتاژ، نقش مهمی در بهبود قابلیت HVRT در DFIG دارد.



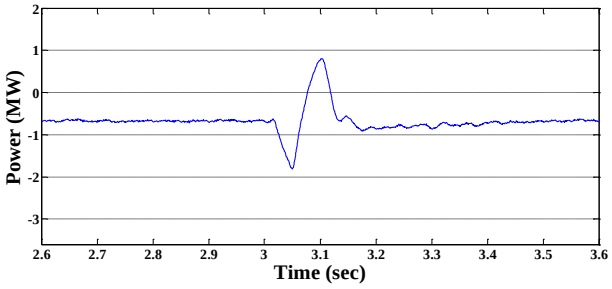
الف)



ب)



ج)



د)

شکل (۱۳): پاسخ SMES به بروز اضافه ولتاژ: الف) جریان، ب) ولتاژ DC ، ج) انرژی، د) توان اکتیو

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، استفاده از SMES و SFCL برای بهبود همزمان قابلیت LVRT و HVRT توربین بادی دارای DFIG در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه به عنوان ایده‌ای جدید مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله ابتدا SFCL بصورت حرارتی و دقیق مدل سازی شده و سپس تاثیر SFCL و SMES در بهبود عملکرد DFIG هنگام بروز افت ولتاژ و اضافه ولتاژ در ریز شبکه در حالت متصل به شبکه ارزیابی شده است.

نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد با استفاده از SMES به همراه SFCL هنگام بروز افت ولتاژ پاسخ گذرای DFIG بهبود یافته که منجر به افزایش قابلیت LVRT می‌گردد. همچنین هنگام بروز اضافه ولتاژ نیز SMES با جذب انرژی از ریز شبکه منجر به بهبود پاسخ گذرای DFIG و در نهایت بهبود قابلیت HVRT می‌گردد. بنابراین استفاده از SMES در ریز شبکه ایده‌ای مناسب جهت کاهش نوسانات توان و همچنین بهبود همزمان قابلیت LVRT و HVRT توربین بادی دارای DFIG می‌باشد.

مراجع

[۱] R. C. Dugan and T. E. McDermott, "Distributed generation," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, pp. 19–25, 2002.

[۲] A. Safaei, B. Vahidi, H. Askarian-Abyaneh, E. Azad-Farsani, and S. M. Ahadi, "A two step optimization algorithm for wind turbine generator placement considering maximum allowable capacity," *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 75–82, 2016.

[۳] J. F. DeCarolis and D. W. Keith, "The economics of large-scale wind power in a carbon constrained world," *Energy Policy*, vol. 34, pp. 395–410 , 2006.

[۴] E. Hau, Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics: *Springer Verlag*, 2006.

[۵] J. Hu, Y. Huang, D. Wang, H. Yuan, and X. Yuan, "Modeling of Grid-Connected DFIG-Based Wind Turbines for DC-Link Voltage Stability Analysis," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 1325–1336, 2015.

[۶] M. F. M. Arani and Y. A. R. I. Mohamed, "Assessment and Enhancement of a Full-Scale PMSG-Based Wind Power Generator Performance Under Faults,"

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]

[۷] x, Huchel, M. S. E. Moursi, and H. H. Zeineldin, "A Parallel Capacitor Control Strategy for Enhanced FRT Capability of DFIG," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 303−312, 2015.

[۸] A. H. Kasem, E. F. El-Saadany, H. H. El-Tamaly, and M. A. A. Wahab, "An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-based wind turbines," *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, pp. 201−214, 2008.

[۹] M. B. C. Salles, K. Hameyer, J. R. Cardoso, A. P. Grilo, and C. Rahmann, "Crowbar System in Doubly Fed Induction Wind Generators," *Energies*, vol. 3, pp. 738−753, 2010.

[۱۰] G. Pannell, D. J. Atkinson, and B. Zahawi, "Minimum-Threshold Crowbar for a Fault-Ride-Through Grid-Code-Compliant DFIG Wind Turbine", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, pp. 750−759, 2010.

[۱۱] C. Wessels, F. Gebhardt, and F. W. Fuchs, "Fault Ride-Through of a DFIG Wind Turbine Using a Dynamic Voltage Restorer During Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 807−815, 2011.

[۱۲] A. O. Ibrahim, T. H. Nguyen, D. C. Lee, and S. C. Kim, "A Fault Ride-Through Technique of DFIG Wind Turbine Systems Using Dynamic Voltage Restorers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, pp. 871−882, 2011.

[۱۳] M. Molinas, J. A. Suul, and T. Undeland, "Low Voltage Ride Through of Wind Farms With Cage Generators: STATCOM Versus SVC," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 1104−1117, 2008.

[۱۴] L. Chen, C. Deng, F. Zheng, S. Li, Y. Liu, and Y. Liao, "Fault Ride-Through Capability Enhancement of DFIG-Based Wind Turbine With a Flux-Coupling-Type SFCL Employed at Different Locations," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, pp. 1−5, 2015.

[۱۵] W. Guo, L. Xiao, S. Dai, X. Xu, Y. Li, and Y. Wang, "Evaluation of the Performance of BTFCLs for Enhancing LVRT Capability of DFIG," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 3623−3637, 2015.

[۱۶] W. Guo, L. Xiao, and S. Dai, "Enhancing Low-Voltage Ride-Through Capability and Smoothing Output Power of DFIG With a Superconducting Fault-Current Limiter-Magnetic Energy Storage System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, pp. 277−295, 2012.

[۱۷] T. Kinjo, T. Senjyu, N. Urasaki, and H. Fujita, "Terminal-voltage and output-power regulation of wind-turbine generator by series and parallel compensation using SMES," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, pp. 276−282, 2006.

[۱۸] Q. Huang, X. Zou, D. Zhu, and Y. Kang" Scaled Current Tracking Control for Doubly Fed Induction Generator to Ride-Through Serious Grid Faults," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 2150−2165, 2016.

[۱۹] R. Zhu, Z. Chen, X. Wu, and F. Deng, "Virtual Damping Flux-Based LVRT Control for DFIG-Based Wind Turbine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, pp. 714−725, 2015.

[۲۰] N. H. Saad, A. A. Sattar, and A. E.-A. M. Mansour, "Low voltage ride through of doubly-fed induction generator connected to the grid using sliding mode control strategy," *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 583−594, 2015.

[۲۱] H. M. El-Helw and S. B. Tennakoon, "Evaluation of the suitability of a fixed speed wind turbine for large scale wind farms considering the new UK grid code," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1−12, 2008.

[۲۲] M. Mohseni and S. M. Islam, "Review of international grid codes for wind power integration: Diversity, technology and a case for global standard," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3876−3890, 2012.

[۲۳] Z. Xing, Q. Tingyu, X. Zhen, and C. Renxian, "Dynamic analysis of doubly fed induction generator during symmetrical voltage swells," in *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference on*, 2011, pp. 1245−1248.

[۲۴] W. J. Park, B. C. Sung, and J. W. Park, "The Effect of SFCL on Electric Power Grid With Wind-Turbine Generation System," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, pp. 1177−1181, 2010.

[۲۵] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, W. XueGuang, and N. Jenkins, "Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, pp. 803−809, 2003.

[۲۶] R. Yuan and Z. Wei, "A novel control strategy of an active crowbar for DFIG-based wind turbine during grid faults," in *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2011, pp. 1137−1142.

[۲۷] M. H. Ali, B. Wu, and R. A. Dougal, "An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 1, pp. 38−47, 2010.

[۲۸] A. Tomoki, T. Rion, T. Murata, J. Tamura, K. Masahiro, M. Yoshiharu, *et al.*, "Evaluation method of power rating and energy capacity of Superconducting Magnetic Energy Storage system for output smoothing control of wind farm," in *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, 2008, pp. 1−6.

[۲۹] Y. Shirai, K. Furushiba, Y. Shouno, M. Shiotsu, and T. Nitta, "Improvement of Power System Stability by Use of Superconducting Fault Current Limiter With ZnO Device and Resistor in Parallel," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 18, pp. 680−683, 2008.

[۳۰] L. Ye and A. Campbell, "Behavior Investigations of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 16, pp. 662−665, 2006.

[۳۱] Y. Lin and K. P. Juengst, "Modeling and simulation of high temperature resistive superconducting fault current limiters," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 14, pp. 839−842, 2004.

[۳۲] S. Kar and S. R. Samantaray, "Time-frequency transform-based differential scheme for microgrid protection," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 310−320, 2014.

زیرنویس‌ها

[1] Doubly Fed Induction Generator

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]

[2] Low Voltage Ride Through
[3] High Voltage Ride Through
[4] Flexible Alternating Current Transmission System
[5] Dynamic Voltage Restorer
[6] Static Synchronous Compensator
[7] Static VAR Compensator
[8] Fault Current Limiter
[9] Superconducting Fault Current Limiter
[10] Superconducting Magnetic Energy Storage
[11] Voltage-Source Converters
[12] Rotor Side Converter
[13] Grid Side Converter
[14] Pulse-Width Modulation
[15] Proportional–Integral
[16] Insulated-Gate Bipolar Transistor

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.4.3]