

بررسی علل سرکابل زدگی در یک شبکه برق فشار متوسط و طراحی راهکارهای اصلاحی برای رفع آن

نعمت اله صیادی زاهدکلانی¹، حسین برهانی بهابادی¹، محمد کیوانفرد¹، احسان قاصدیان¹

مهدی جلالی مشایخی² شرکت پژوهنده نیرو، شرکت مشاوران سازه²

اصفهان، تهران، ایران

sayadi.eprad@yahoo.com, h.borhani@yahoo.com, keivanfard@gmail.com, ehsan.ghasedian@gmail.com
mashayekhi62@gmail.com

هستند. با توجه به کاربرد گسترده کابل‌ها در شبکه‌های قدرت، عیب یابی و نگهداری آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برداشتن عایق انتهایی کابل جهت سرکابل زنی و اتصال به باس یا تجهیزات دیگر، باعث ایجاد گرادیان شدید ولتاژ در این نقطه از کابل می‌شود که یک نقطه ضعیف به حساب می‌آید و در صورت وقوع اضافه ولتاژ گذرا اولین نقطه‌ای که آسیب می‌بیند این نقاط ضعیف هستند. سرکابل‌ها در شبکه‌های قدرت یکی از نقاط حساس از دیدگاه قابلیت اطمینان محسوب می‌شوند. مطالعات فراوانی در مورد نحوه ساخت و نصب سرکابل، سرویس و نگهداری و بررسی وضعیت حین کار سرکابل انجام شده است. خروج یک کابل هرچند برای مدت کوتاه، می‌تواند منجر به کاهش تولید و خسارت فراوان شود. به منظور پیشگیری از هرگونه خرابی یا بروز وضعیت غیرعادی در کابل عواملی که باعث ضعف سرکابل می‌شوند باید به دقت مورد بررسی قرار گیرند. از جمله عوامل خرابی سرکابل‌ها می‌توان به ضعف در طراحی و ساخت، عملکرد در شرایط نامطلوب محیطی، اضافه جریان در لحظات فالت، اجرای نامناسب و غیر استاندارد سرکابل و پیری عایق سرکابل در اثر وقوع مکرر گذراهای ولتاژ اشاره کرد.

پدیده‌های گذرای الکتریکی در نتیجه تغییرات آنی در مدار ایجاد می‌شوند. باز و بسته شدن کلیدها و یا بروز خطا، از مهمترین عیوب عوامل پدیده‌های گذرا در سیستم قدرت هستند. در مقایسه با عملکرد سیستم در حالت ماندگار، حالت‌های گذرا بسیار سریع رخ می‌دهند و مدت زمان بسیار کمی دارند.

در لحظات کلیدزنی، انرژی می‌تواند از یک حالت به حالت دیگر تغییر

چکیده — خسارات ناشی از خطا و خرابی در تجهیزات مهم شبکه نظیر کابل‌ها فقط منحصر به تعمیر و بازیابی آنها نیست. بلکه قطع سرویس در مدت تعمیرات تا بازگشت مجدد آنها به سرویس خسارات به مراتب سنگین‌تری را به شبکه تحمیل می‌کند. لذا بررسی و یافتن علل و عواملی که منجر به حوادث و خسارت به این تجهیزات می‌شوند ضروری است. در این مقاله علل آسیب دیدن سرکابل‌های ۲۰ کیلوولت یک مجتمع صنعتی بررسی شده است. کلیه اجزای شبکه برق این مجتمع توسط نرم افزارهای EMTF و DigSILENT مدل شده و مطالعات گذرا جهت بررسی علل سرکابل زنی انجام شدند. به منظور صحت سنجی نتایج شبیه‌سازی، پارامترهای کیفیت توان با استفاده از دستگاههای آنالیزر در نقاط مختلف شبکه اندازه‌گیری شدند که گذراهای ثبت شده حاکی از دقت شبیه‌سازی‌ها هستند. سپس راهکارهای اصلاحی برای اصلاح پاسخ فرکانسی سیستم و کاهش دامنه رزونانسهای موازی و حذف گذراها ارائه می‌گردد. اجرای راهکارها موجب کاهش مؤثر دامنه گذراها و افزایش نرخ تغییرات ولتاژ (dv/dt) در کلیه پستهای برق این مجتمع می‌شود.

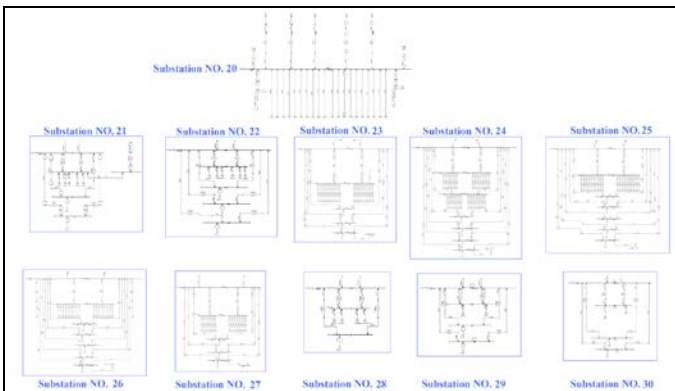
واژه‌های کلیدی — اضافه ولتاژهای گذرا، سیستم‌های کابلی،

سرکابل زنی، پاسخ فرکانسی، کیفیت توان، رزونانس

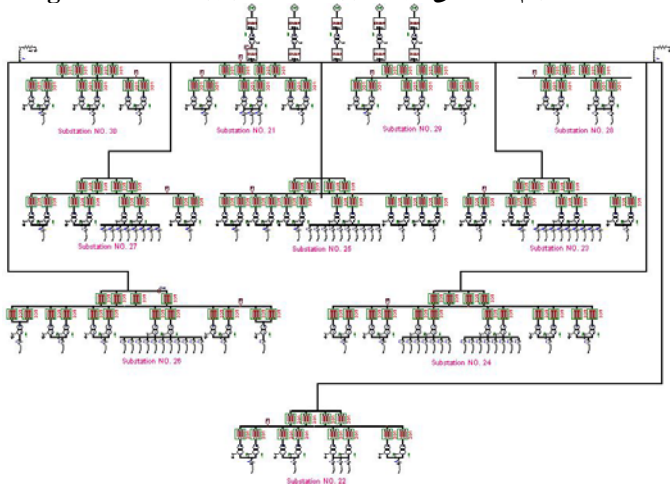
۱. مقدمه

کابل‌ها یکی از اجزای اصلی و پر کاربرد در شبکه‌های برق صنعتی

شبکه صنعتی مورد مطالعه دارای پنج سطح ولتاژ ۰/۴، ۶، ۱۰ و ۲۰ کلوولت است که در این سطح ۱۰ کلوولت مربوط به باس ژنراتورهای این شبکه است. مجسم و عاً بخش از ۳۱۹ عدد فیدر کابلی در این شبکه برق وجود دارد که بعضاً در بئ آنها کابل‌های چند رشته نئ وجود دارد. مجموع طول کابل‌ها بخش از ۵۱ کیلومتر م باشد. همچن بئ تعداد ۱۲۰ عدد ترانسفورماتور با ظرفیت‌های مختلف در این شبکه نصب شده است. تعداد نقاط مصرف عمده در این شبکه ۴۱ نقطه است که شامل باس‌های ۴۰۰ ولت و ۶ کلوولت اصلی می‌شود. موتورهای اصلی این مجموعه با قدرت نامی ۱۵۰ کلووات تا ۲۵۰۰ کلووات در سطح ولتاژ ۶ کلوولت وجود دارند. اتصال کلیه ترانسفورمرها در سمت ۲۰ کیلوولت مثلث می باشد لذا دو راکتور با اتصال ز یگزاگ در پست اصلی شبکه جهت ایجاد مسری جرطن اضلال کوتاه تکفاز به زمین نصب شده است. دیاگرام تک خطی این شبکه در محیط نرم‌افزارهای DigSILENT و EMTP به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می شود.



شکل ۱: دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه، در برنامه DigSILENT



شکل ۲: دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه، در برنامه EMTP

۲. اندازه گیری کیفیت توان در شبکه مورد

کرده و این تغییر ناگهانی در قالب اضافه ولتاژ یا جریان ایجاد می‌شود [۱]. از سوی دیگر در برخی از شبکه‌ها انرژی بطور پیوسته از حالت مغناطیسی به الکتریکی و بلعکس تبدیل می‌شود که به این پدیده رزونانس در سیستم گفته می‌شود [۲].

از نقطه نظر الکتریکی، شباهت زلوی بئ کابل‌ها و بانک خازنی وجود دارد. برق‌دار کردن یک کابل دارای اثرات مشابه برق‌دار کردن بانک خازنی است. برق‌دار کردن بانک خازنی باعث ایجاد جرطن‌های لحظه‌ای می‌شود که دامنه و فرکانس آنها به ولتاژ لحظه وصل و مشخصات شبکه بالادست بستگی دارد [۳-۵]. خازن کابل بطور یکنواخت در طول آن پخش شده است. بنابراین بئ خاطر امپدانس سری کابل‌ها و خازن پخش شده در طول آن، جرطن هجومی برق‌دار کردن کابل‌ها به بزرگی بانک‌های خازنی نیست [۶]. با این حال، جرطن هجومی برق‌دار کردن کابل نئ ممکن است برای مدار شکن و سرکابل‌ها خطرناک باشد [۷].

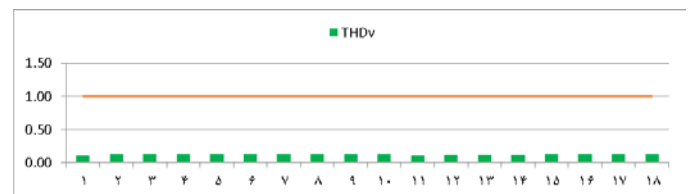
شبه‌سازی و بررسی حالات گذرا در سیستم‌های قدرت جز با ارائه یک مدل دقیق از شبکه امکان‌پذیر نیست. در این مقاله یک شبکه الکتریکی صنعتی که در آن تمام فیدرهای فشار متوسط به صورت کابلی هستند، بطور دقیق در نرم‌افزارهای EMTP و DIGSILENT مدل‌سازی شده است و مطالعات اتصال کوتاه و مطالعات گذرا انجام شدند. برای اطمینان از دقت مناسب مدل‌سازی برای انجام مطالعات گذرا، چندین سناریوی کلیدزنی اجرا شده و گذراهای ولتاژ در لحظات کلیدزنی در پستهای مختلف اندازه‌گیری و ثبت شدند. نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مذکور حاکی از صحت و دقت مناسب مدل‌سازی بودند. پس از ریشه‌یابی گذراها، راهکارهای اصلاحی مختلف در شبیه‌سازی چک شده و در نهایت راهکار بهینه از نظر فنی و اقتصادی ارائه می‌گردد. شبکه مورد مطالعه

شبکه برق صنعتی مورد مطالعه یک شبکه جزئی‌های و مستقل از شبکه برق سراسری است که توسط پنج ژنراتور محلی تغذیه می‌گردد. از نرم‌افزار DigSILENT برای انجام شبیه‌سازی‌ها و مطالعات مورد نظر در شبکه مورد مطالعه استفاده شده است. این انتخاب نرم‌افزار، با توجه به امکانات متعدد این نرم‌افزار اعم از امکان درلغت اطلاعات کامل تجهیزات، مدل بار، درلغت منحنی بار، انجام مطالعات پخش بار- اتصال کوتاه- پخش بار هارمونیک و گذراها و امکان برنامه‌نویسی در این نرم‌افزار به کمک زبان برنامه‌نویسی آن (DPL) و وجود قابلیت برنامه‌نویسی با زبان شبیه‌سازی این نرم‌افزار (DSL) صورت گرفته است. همچنین استفاده از نرم‌افزار EMTP به دلیل وجود مدل وابسته به فرکانس کابل‌ها و امکان تحلیل گذراهای کلیدزنی کابل می‌باشد.

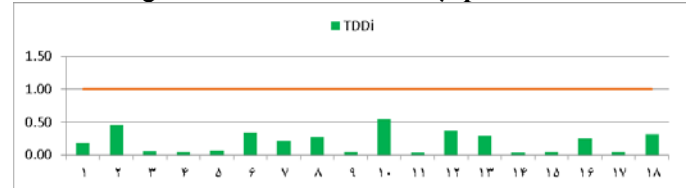
مطالعه

به منظور بررسی وضعیت پارامترهای کیفیت توان، ۲۵ نقطه از شبکه برق تحت مطالعه با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری کیفیت توان Unipower با کلاس دقت A مطابق استاندارد IEC61000-4-30 مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. ۱۸ اندازه‌گیری در سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت، ۵ اندازه‌گیری در سطح ولتاژ ۶ کیلوولت و ۲ اندازه‌گیری در سطح ولتاژ ۰/۴ کیلوولت انجام شد. انتخاب نقاط اندازه‌گیری بر اساس نوع بارهای هر پست و پاسخ فرکانسی در هر پست صورت گرفت.

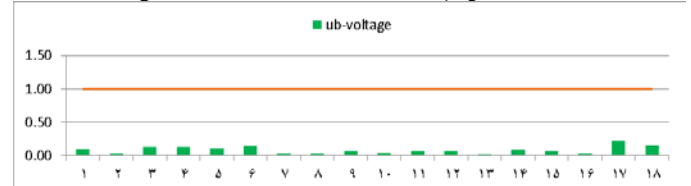
خلاصه نتایج اندازه‌گیری کیفیت توان اعم از اعوجاج کلی هارمونیک‌های ولتاژ (THD)، اعوجاج کلی هارمونیک‌های جریان (TDD)، عدم تعادل ولتاژ، فلیکر کوتاه مدت (Pst) و فلیکر بلند مدت (Plt) در نقاط اندازه‌گیری شده در سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت در شکل‌های ۳ الی ۷ نشان داده شده است. در شکل‌های مذکور مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای مختلف، نسبت به مقدار مجاز آنها که در استاندارد نرمالیزه شده‌اند. لذا در شکل‌ها، مقدار "۱" بیانگر حد مجاز استاندارد پارامتر مربوطه نسبت به مقدار بیان شده در استاندارد است. با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌ها و مقایسه با سطوح مجاز استاندارد، از نظر پارامترهای کیفیت توان به غیر از گذراها، دیگر پارامترها در حد مجاز استاندارد می‌باشند.



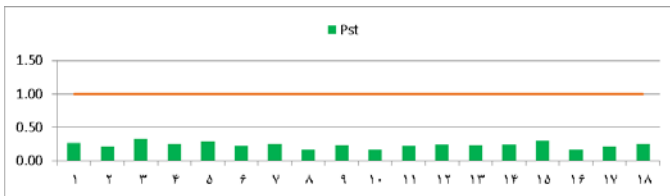
شکل 3: مقادیر cp95% پریونیت شده THD ولتاژ در سطح 20 کیلوولت



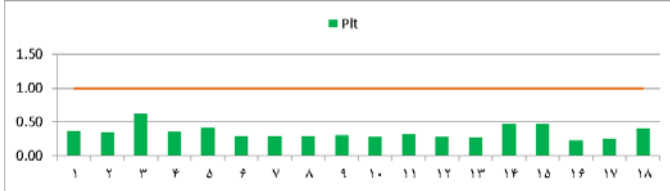
شکل 4: مقادیر cp95% پریونیت شده TDD جریان در سطح 20 کیلوولت



شکل 5: مقادیر cp95% پریونیت شده عدم تعادل ولتاژ در سطح 20 کیلوولت



شکل 6: مقادیر cp95% پریونیت شده Pst ولتاژ در سطح 20 کیلوولت



شکل 7: مقادیر cp95% پریونیت شده Plt ولتاژ در سطح 20 کیلوولت

لازم به توضیح است که هارمونیک‌های ولتاژ و جریان تا مرتبه ۵۰ مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند و کلیه هارمونیک‌های ولتاژ و جریان در محدوده مجاز استاندارد می‌باشند.

جدول ۱ تعداد گذراهایی را که در طی دوره اندازه‌گیری (۳ هفته) در شبکه تحت مطالعه ثبت شده است را نشان می‌دهد. پدیده‌های گذرای غی مجاز مطابق با استاندارد به پدیده‌هایی اطلاق می‌شود که زمان آنها بین ۰/۱ تا ۱ میلی‌ثانیه با دامنه بیش از ۲۰٪ (۲ پریونیت) است. زمان آنها بین یک تا ۱۰ میلی‌ثانیه با دامنه بیش از ۱۵٪ است. در جدول ۱ گذراهای مجاز به گذراهایی اطلاق شده است که یا دامنه آنها از ۱۱۵٪ بیشتر و کمتر از ۱۵۰٪ است اما زمان طولانی‌تری نسبت به ارقام یاد شده دارند و یا اینکه دارای زمان‌های کوتاه‌تر ولی دامنه‌های بیشتری هستند.

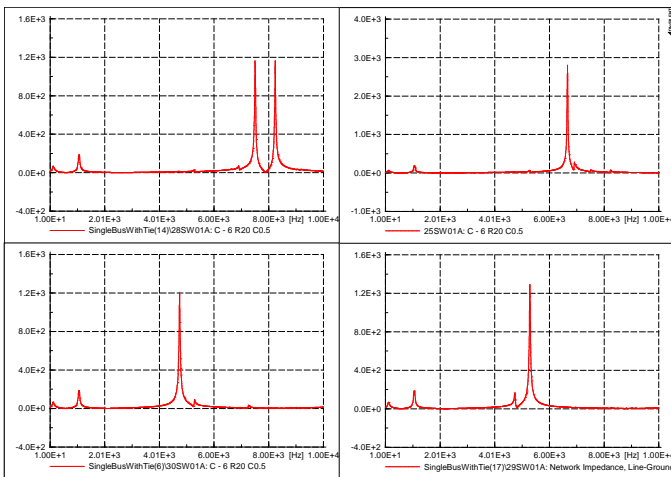
جدول 1: تعداد گذراهای ثبت شده در طول دوره اندازه‌گیری در شبکه مورد مطالعه

نقطه اندازه‌گیری	تعداد گذراها		نقطه اندازه‌گیری	تعداد گذراها	
	مجاز	غیر مجاز		مجاز	غیر مجاز
۱	۲۲	۰	۱۰	۰	۲
۲	۳	۰	۱۱	۱	۱
۳	۴	۰	۱۲	۰	۲
۴	۱	۰	۱۳	۰	۲
۵	۱	۰	۱۴	۰	۳
۶	۲	۰	۱۵	۰	۵
۷	۲	۰	۱۶	۰	۲
۸	۳	۴	۱۷	۴	۱
۹	۳	۰	۱۸	۰	۴

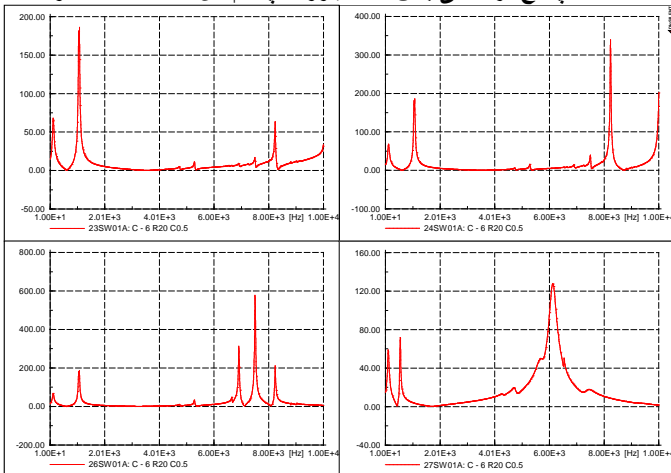
وقوع مکرر پدیده‌های گذرا در شبکه می‌تواند منجر به پیری عایق تجهیزات و فرسودگی زودرس و در نهایت شکست عایقی و خرابی تجهیزات

کابل‌های موتورهای با توان بالا سبب ایجاد رزونانس موازی در باس‌های ۶ کیلوولت شده و اضافه ولتاژ حاصل از آن سبب سرکابل زدگی شده است. در بررسی اضافه ولتاژها، علاوه بر دامنه اضافه ولتاژ باید به تغییرات ولتاژ نسبت به زمان یعنی dv/dt نیز توجه داشت. وجود جریان پالسی شدید هنگام وصل کلید باعث وقوع این مشکل می‌گردد، به این ترتیب که در هنگام وصل کلید یک جریان پالسی که دارای فرکانسهای مختلف است در شبکه تزریق می‌شود و می‌تواند ولتاژهای بسیار بالا در فرکانسهای رزونانس موازی ایجاد نماید.

شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ پاسخ فرکانسی باس‌های ۲۰ کیلوولت شبکه مورد مطالعه را از فرکانس ۱۰ هرتز تا فرکانس ۱۰ کیلوهرتز نمایش می‌دهند.



شکل ۱۰: پاسخ فرکانسی باس ۲۰ کیلوولت پست‌های ۲۵، ۲۸، ۲۹ و ۳۰

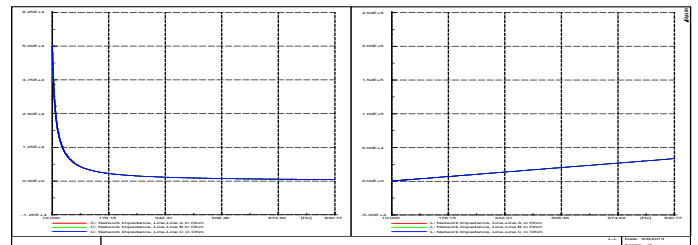


شکل ۱۱: پاسخ فرکانسی باس ۲۰ کیلوولت پست‌های ۲۳، ۲۴، ۲۶ و ۲۷

گردد. گذراها معمولاً در نقاط ضعف عایقی تجهیزات مانند سرکابل‌ها، به‌ترتیب ترانسفورماتورها و پیشانی سیم بندی موتورها و ... اثرات مخرب بیشتری دارند. بنابراین با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، عاملی که بیشترین اثر مخرب را در سرکابل زدگی دارد، گذراهای ایجاد شده در شبکه هستند. با مطالعات میدانی انجام شده و تطبیق زمان وقوع گذراها با زمان انجام عملیات‌های بهره‌برداری مختلف، گذراهای ایجاد شده در شبکه به علت راه‌اندازی موتورهای القایی ۶ کیلوولت و برق‌دار کردن کابل‌ها و ترانسفورماتورهای داخل شبکه می‌باشد.

۳. بررسی پاسخ فرکانسی شبکه مورد مطالعه

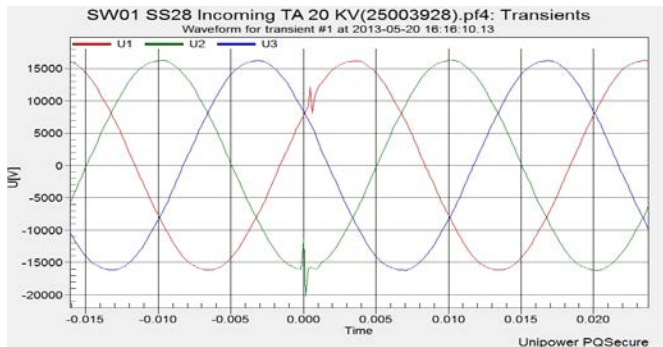
به منظور بررسی پاسخ فرکانسی یک شبکه می‌بایست امپدانس معادل هر باس در فرکانس‌های مختلف را برای حالات کاری گوناگون بدست آورد و رزونانسهای سری و موازی احتمالی را استخراج نمود. برای آشنایی بیشتر با پاسخ فرکانسی در شکل ۸ پاسخ فرکانسی یک خازن (سمت چپ) و سلف (سمت راست) نشان داده شده است. این شکل امپدانس خازن/سلف را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. با افزایش فرکانس، امپدانس خازن بصورت نمایی کاهش و امپدانس سلف بصورت خطی افزایش می‌یابد.



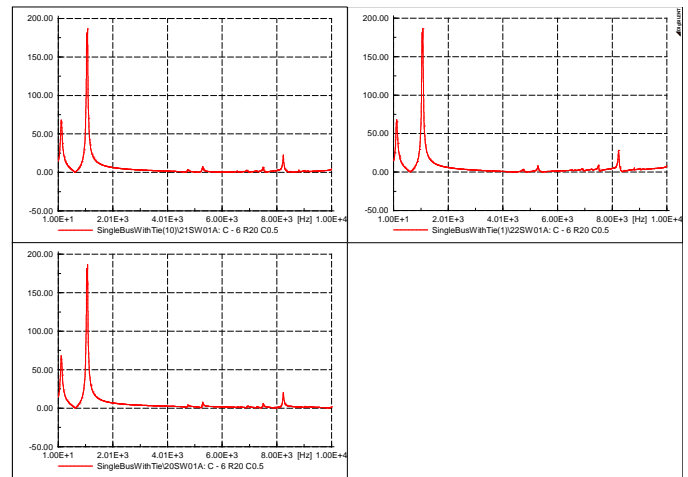
شکل ۸: پاسخ فرکانسی سلف (سمت راست) و خازن (سمت چپ)

یک شبکه الکتریکی متشکل از مجموعه‌ای از مقاومت‌ها، خازن‌ها و سلف‌ها است که پاسخ فرکانسی آن در هر باس و هر فرکانس بسته به آرایش و مقدار سلف، خازن و مقاومت شبکه از دید آن باس حالت متفاوتی دارد.

سوئیچینگ جریان‌های با ضریب توان کم می‌تواند باعث ایجاد قطع و وصل‌های پیوسته و با فرکانس بالا در کلیدهای قدرت شود. بسته به پارامترهای مدار و عملکرد کلید این گذرای کلیدزنی می‌تواند در یک، دو یا هر سه فاز نمایان شود. زمانی که فرمان قطع به یک کلید قدرت ارسال می‌شود و تیغه‌های آن از هم باز می‌شوند، جریان به نقطه گذر از صفر خود نزدیک شده و قطع و وصل‌های پیوسته‌ای اتفاق افتاده و سبب ایجاد یک جریان با فرکانس بسیار بالا شده که این جریان به نوبه خود قادر به تحریک فرکانس‌های رزونانس سیستم می‌شود. در سیستم برق شبکه مورد مطالعه در این مقاله عملکرد قطع و وصل فرکانس بالای سوئیچ‌ها علی‌قطع و وصل یک



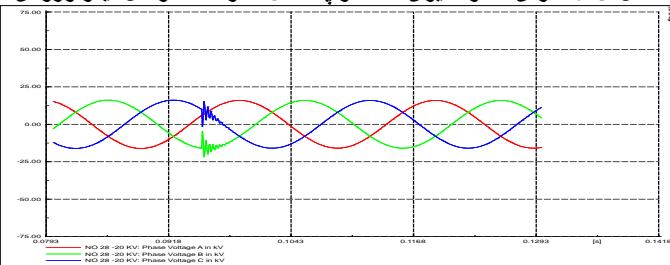
شکل 13: گذرای اندازه گیری شده در پست 28 در لحظه وصل فیدر ورودی



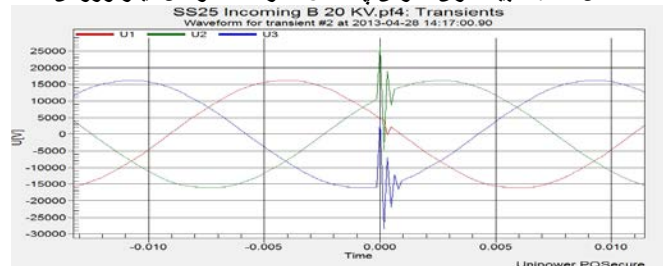
شکل 12: پاسخ فرکانسی باس 20 کیلوولت پستهای 20، 21 و 22 با توجه به شکل‌های پاسخ فرکانسی در باس‌های مختلف شبکه مشخص می‌گردد که در بسیاری از باس‌ها فرکانس‌های رزونانس مختلفی وجود دارد و بنابراین هنگام کلیدزنی در شبکه امکان وقوع گذراهای ولتاژ وجود دارد.

۴. گذراهای ثبت شده در طول دوره اندازه‌گیری و مقایسه آن‌ها با نتایج شبیه‌سازی‌ها

در این قسمت تعدادی از گذراهای ثبت شده در سطح ولتاژ 20 کیلوولت ناشی از کلیدزنی فیدر پست‌ها در طول دوره اندازه‌گیری با نتایج حاصل از کلیدزنی همان فیدر در شبیه‌سازی مقایسه می‌گردد.



شکل 14: شبیه‌سازی گذرای پست 28 در لحظه وصل فیدر ورودی



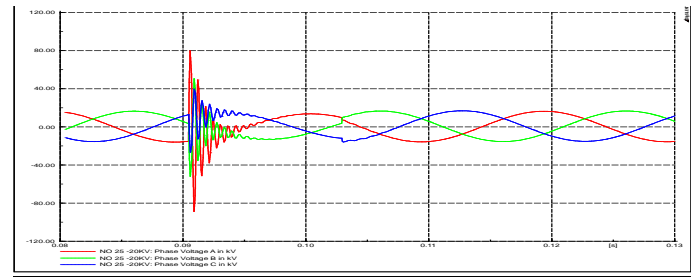
شکل 15: گذرای اندازه گیری شده در پست 25 در لحظه وصل فیدر ورودی

با بررسی گذراهای ثبت شده در طول دوره اندازه‌گیری ملاحظه می‌گردد که هر پستی که از نظر پاسخ فرکانسی در وضعیت مطلوبتری قرار دارد کمتر مستعد ایجاد گذرا در آن پست است. البته ممکن است در آن پست‌ها نین گذرای ثبت شده باشد که ناشی از انتقال گذراهای ایجاد شده در پست‌های دیگر به آن پست است. این امر را با توجه به همزمانی و دامنه گذراهای ثبت شده می‌توان تشخیص داد. خاطر نشان می‌گردد که گذراهای ایجاد شده در هر باس در صورتی که حاوی فرکانس‌هایی باشد که در آن فرکانس مقدار امپدانس سیستم قابل توجه باشد، ایجاد گذرای ولتاژی با دامنه بالا را ممکن می‌سازد. شکل‌های 13 تا 16 دو نمونه از گذراهای ایجاد شده در شبکه راه در اثر برق‌دار کردن فیدر پست 28 و 24 و 25 در حالت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان می‌دهند.

شکل 16: شبیه‌سازی گذرای پست 25 در لحظه وصل فیدر ورودی

همچنین زمان وقوع کلیدزنی نین تأثیر بسزایی در وقوع گذرا و دامنه آن دارد. بطور نمونه شکل 17 منحنی گذرای ایجاد شده در اثر کلیدزنی فیدر نین پست 20 و 25 را در زمانی که بهترین دامنه گذرا در آن ایجاد می‌شود، نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در اثر کلیدزنی دامنه گذرای ایجاد شده در پست 25 که از نظر پاسخ فرکانسی نین مطلوب نمی‌باشد تا بیش از 6 پریودت افزایش یافته است.

است که دامنه گذرا به حدود ۲ پریونیت کاهش یافته است. مقدار تغییرات ولتاژ نسبت به زمان (dv/dt) در این حالت برابر ۱۶/۷ ولت بر میکروثانیه است که بسیار کمتر از حالت قبل است. لذا تنها با کنترل لحظه وصل کلید و بدون هیچگونه تغییری در تجهیزات و آرایش شبکه قدرت می توان گذرای ولتاژ را بسیار بهبود بخشید.

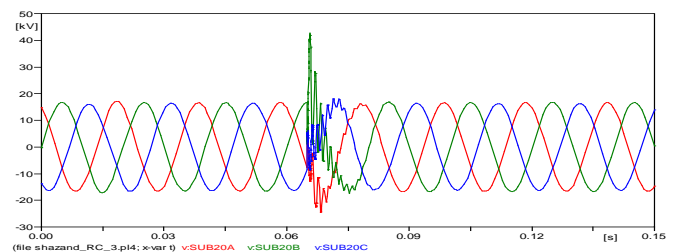


شکل 17: شبیه سازی گذرای پست 25 در بدترین حالت از نظر زمان کلیدزنی

۵. راهکارهای بهبود گذراهای ولتاژ

همانطور که بیان شد گذراها در اثر تحریک رزونانسهای موازی شبکه در لحظات کلیدزنی اتفاق می افتند. لذا در مراحل اولیه طراحی یک شبکه قدرت می بایست مطالعات گذرا انجام داده و پاسخ فرکانسی شبکه را بطور دقیق بررسی نموده و در صورت وجود رزونانس در شبکه با تغییر آرایش یا تغییر مشخصه تجهیزات انتخاب شده، پاسخ فرکانسی را اصلاح نمود. در صورتیکه این مسایل در مراحل طراحی رعایت نگردد و مشکل گذرا در یک شبکه قدرت وجود داشته باشد با استفاده از راهکارهای جبران می توان پاسخ فرکانسی را بهبود بخشید.

در شکل ۱۸ ولتاژ گذرای شبیه سازی شده در اثر وصل فیدر پست ۲۴ نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، دامنه اضافه ولتاژ ایجاد شده ۵۸/۲ کلوولت (حدود ۵ پریونیت) است. همچنین، مقدار تغییرات ولتاژ نسبت به زمان (dv/dt) برابر ۸۴ ولت بر میکروثانیه است. در ادامه نتایج بهبود این اضافه ولتاژ پس از اعمال روشهای مختلف اصلاحی ارائه می گردد تا میزان بهبود در هر روش مشخص گردد.

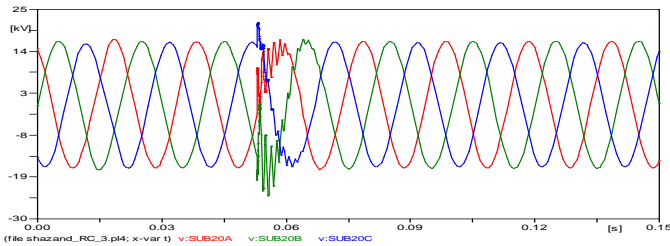


شکل 18: گذرای ست 20 در هنگام کلید زنی کابل 20-24

۵.۱ کنترل لحظه وصل کلید

برای وصل یک کابل قدرت که دشارژ شده باشد، بهترین لحظه نقطه گذر از صفر ولتاژ است زیرا در این لحظه جریان هجومی بسیار ناچیز بوده و در نتیجه اضافه ولتاژ گذرا کاهش می یابد. بدین ترتیب با کنترل لحظه وصل می‌توان دامنه اضافه ولتاژهای گذرا را کاهش داد.

در شکل ۱۹ اضافه ولتاژ ایجادشده در لحظه وصل به‌عنه نشان داده شده



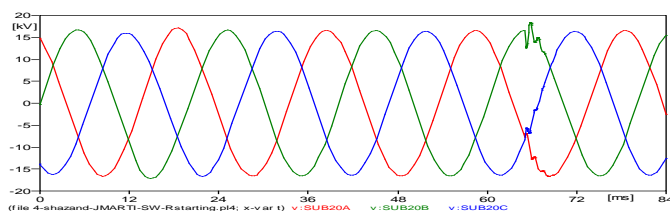
شکل 19: گذرای شبیه سازی شده با کنترل لحظه کلیدزنی فیدر پست 24

این سیستم توسط شرکت پژوهنده نیرو ثبت اختراع شده و نمونه صنعتی آن در شرکت فولاد مبارکه اصفهان نصب و تست گردیده است. محل نصب آن در مدار فرمان وصل کلید است و نیاز به تغییر خاصی در سیستم نیست و تنها لحظه وصل کلید را از حالت تصادفی به حالت کنترل شده تغییر می دهد.

۵.۲ مقاومت راه انداز در لحظه وصل کلید

در این روش از یک مقاومت سری شده با هر فاز استفاده می‌شود که در یک سمت کابل استفاده می‌گردد. این مقاومت اثر میرا کننده بر جریان گذرنده از هر فاز دارد و باعث می‌شود که جریان با سرعت بیشتری به مقدار ماندگار خود برسد. مقدار این مقاومت هر چقدر بیشتر باشد سرعت هرا شدن جریان نیز بیشتر خواهد شد. این مقاومت فقط چند سیکل اول در مدار می باشد و بعد از آن از مدار خارج می‌شود. در این روش در انتخاب مقدار مقاومت و زمان خارج کردن آن از مدار باید دقت بسیاری شود.

در شکل ۲۰ اضافه ولتاژ کلیدزنی با روش مقاومت راه‌انداز نشان داده شده است. میزان مقاومت سری شده ۲۰۰ اهم است و اضافه ولتاژ به ۱/۱ پریونیت کاهش یافته است. مقدار تغییرات ولتاژ نسبت به زمان (dv/dt) در این حالت برابر ۱۰/۲ ولت بر میکروثانیه است.

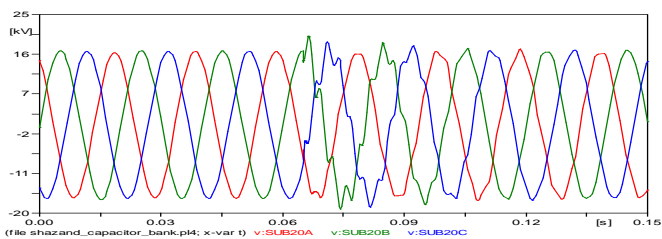


شکل 20: گذرای شبیه سازی شده با تزریق مقاومت در لحظه وصل فیدر 24

از معایب مهم این روش این است که استفاده از سه مقاومت با توان بالا

مدار و کاهش تداخل الکترومغناطیسی با میایی ولتاژ و جریانی.

با انجام تحلیل آنالیز حساسیت کلیه باسهای شبکه، باسهایی که نصب اسنابر بیشترین تأثیر مثبت را بر پست خود و دیگر پستهای مجاور دارد، انتخاب می‌شوند و سپس مقادیر مقاومت و خازن با استفاده از یک تابع بهینه سازی با هدف بیشترین کاهش دامنه گذراها و بهبود پاسخ فرکانسی در شبکه تعیین می‌گردد. در این تابع قید تلفات مقاومت‌ها نیز باید در نظر گرفته شود. با اعمال روش مذکور، از بین ۱۱ پست ۲۰ کیلوولت شبکه مورد مطالعه، ۶ پست به عنوان پستهای مناسب جهت نصب اسنابر تعیین شدند. همچنین مقدار خازن و مقاومت بهینه مدار اسنابر به ترتیب برابر با ۰/۵ میکروفاراد و ۲۰ اهم انتخاب شدند. شکل ۲۲ گذرای ناشی از کلپزنی فیدر پست ۲۴ رابا نصب ۶ عدد اسنابر در پستهای مذکور نشان می‌دهد.



شکل ۲۲: گذرای شبیه سازی شده برای کلپزنی فیدر ۲۴ با نصب اسنابر

با توجه به شکل ۲۲ ملاحظه می‌گردد که اضافه ولتاژ به حدود ۱/۸ پریونیت کاهش یافته است. مقدار تغییرات ولتاژ نسبت به زمان (dV/dt) در این حالت برابر ۱۳/۴ ولت بر میکروثانیه است.

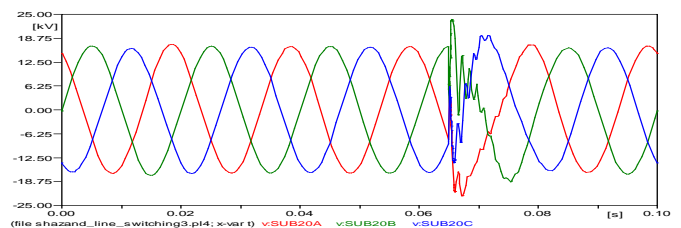
۵.۵. پاسخ فرکانسی شبکه پس از نصب اسنابر

شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ پاسخ فرکانسی کلیه پستهای ۲۰ کیلوولت شبکه مورد مطالعه را در پس از نصب اسنابر مطابق با بخش ۶.۴ تا فرکانس ۱۰ کلوهرتز نمایش می‌دهند. برای مقایسه بهتر اثر مدارات اسنابر، مقیاس شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ بطور متناظر با شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ یکسان است. با توجه به شکل‌های پاسخ فرکانسی در باسهای مختلف شبکه در حضور مدار اسنابر مشخص می‌گردد که در کلیه پستها، پاسخ فرکانسی به طور چشم‌گیری بهبود یافته است که با توجه به شکل ۲۳ دامنه گذراها و dV/dt آن نیز کاهش قابل توجهی را دارد.

و همچنین سه کلید برای خارج کردن آنها هزینه و فضای زیادی نیاز خواهد داشت. همچنین برای جلوگیری از وقوع گذرا هنگام خارج کردن مقاومت، لازم است مقاومت در چند پله بصورت تدریجی از مدار خارج شود.

۵.۳. برقیگیر

برقیگیرها ادواتی هستند که بصورت موازی در شبکه قدرت و با هدف ایجاد یک مسیر کم امپدانس در برابر اضافه ولتاژها و محدود کردن آنها به مقادیری کمتر از سطح عایقی تجهیزات نصب می‌گردند. این در شرایطی است که برقیگیرها در شرایط عادی ولتاژ شبکه باید مثل مدار باز عمل کنند. این امر نیازمند غیر خطی بودن مشخصه برقیگیر می‌باشد. با توجه به شکل ۲۱ در اثر حضور برقیگی در پست ۲۰، دامنه اضافه ولتاژ گذرای ناشی از کلپزنی در این پست اضافه ولتاژ به ۲/۲ پریونیت کاهش یافت ولیکن نرخ تغییرات لحظه ای ولتاژ هنوز وجود دارد.



شکل ۲۱: گذرای شبیه سازی شده برای کلپزنی فیدر ۲۴ با حضور برقیگیر

بنابراین، با توجه به آنکه دامنه بسیاری از گذراهای کلپزنی مشاهده شده در حدود ۲۵ کیلوولت است، نصب برقیگی کمک چندان به حذف این گذراها نمی‌کند. همچنین برقیگی ناشی بر روی dV/dt گذراها ندارد. از طرف دیگر در صورت صحیح انتخاب نشدن امکان انفجار برقیگی و تبدیلی شدن اتصال کوتاه های تکفاز به زمینی به اتصال کوتاه سه فاز وجود دارد. مقدار تغییرات ولتاژ نسبت به زمان (dV/dt) در این حالت برابر ۴۸/۹ ولت بر میکروثانیه است.

۵.۴. مدار اسنابر

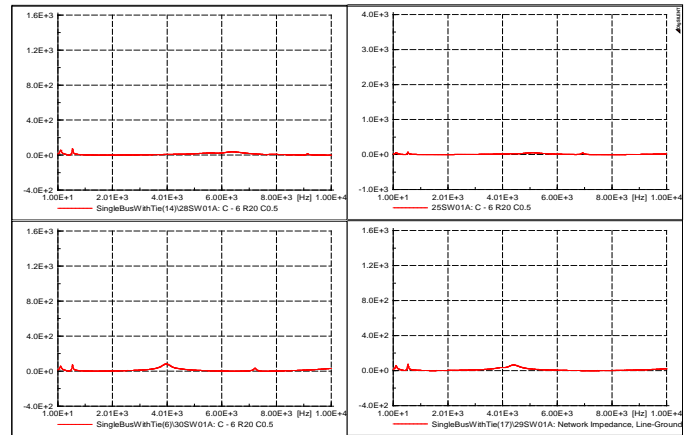
مدار اسنابر یک مدار خازنی و اهمی است که این مدار جهت حفاظت مدارهای الکترونیکی در مقابل تغییرات ولتاژ نسبت به زمان استفاده می‌شود. مدار اسنابر ماهیت خازنی دارد و می‌تواند از تغییرات ولتاژ مشتق‌گهی منابع و جریانی خازنی ایجاد می‌کند. این جریانی شدید لحظه‌ای به صورت تلفات توان در مقاومت سری با خازن تلف می‌شود. مدار اسنابر وظیفه دارد که از تجهیزات در برابر اضافه ولتاژ حفاظت کند و همچنان به منظور بهبود عملکرد مدار استفاده می‌شود. برخی دیگر از وظایف این مدارات عبارتند از: کاهش بی‌حذف جریانی و ولتاژهای اضافی، محدود کردن (dV/dt) و (dI/dt)

که در صورت تحریک شدن در لحظات کلیدزنی می‌توانند گذراهای ولتاژ شدیدی ایجاد نمایند.

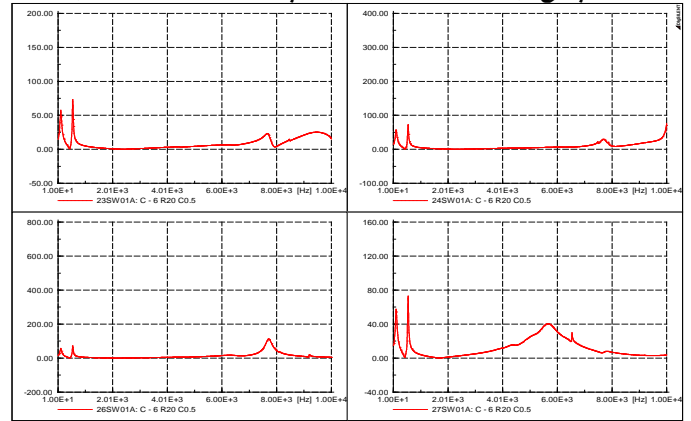
به منظور رفع این مشکل راهکارهای گوناگونی مانند کنترل لحظه کلید زنی، افزودن مقاومت در لحظه وصل کلید، برق‌گیر و استفاده از مدار اسنابر مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت. از بین راهکارهای مختلف مدار اسنابر با توجه به کاهش دامنه گذراها و کاهش تغییرات ولتاژ نسبت به زمان و بهبود قابل توجه پاسخ فرکانسی پستهای شبکه، دارای تأثیر بهتری در کاهش گذراها دارد.

منابع

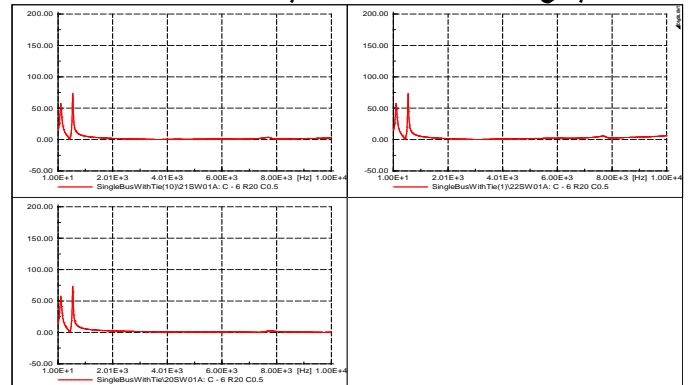
- [1] S.R.Mendis, D.A. Gonzales, Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, 1992.
- [2] O.A. Soysal, Protection of Arc Furnace Supply Systems from Switching Surges, IEEE Conference, 1998.
- [3] S.G. Johanson, L. Liljstrand, F. Krogh, J. Karlstrand, J. Hanson, AC Cable solutions for Offshore Wind Energy, in: Copenhagen Offshore Wind Conference, 2005.
- [4] IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks, IEEE Std. C37.99-2000, 2000.
- [5] C.D. Tsirekis, N.D. Hatziaargyriou, Control of Shunt Capacitors and Shunt Reactors Energization Transients, in: International Conference on Power Systems Transients, 2003.
- [6] IEEE Application Guide for Capacitive Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers, IEEE Std. C37.012-2005, 2005.
- [7] F. Ritcher, Switching of Capacitive Currents - Back-to-back Cables, Siemens Energy Sector, 2009.



شکل 23: پاسخ فرکانسی باس 20 کطولت پست‌های 25، 28، 29 و 30



شکل 24: پاسخ فرکانسی باس 20 کطولت پست‌های 23، 24، 26 و 27



شکل 25: پاسخ فرکانسی باس 20 کطولت پست‌های 20، 21 و 22

۶. نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی نشان داد که وقوع مکرر پدیده‌های گذرای کلیدزنی در شبکه مورد مطالعه موجب دیدن سرکابلهای فشار متوسط می‌شوند. مطالعه پاسخ فرکانسی پستهای مختلف شبکه نشان داد رزونانسهای موازی با دامنه‌های بسیار بالا در بعضی از فرکانسها وجود دارند