

گزارش ویژه محور دوم :

کیفیت برق و سازگاری الکترومغناطیسی

دکتر علیرضا جلیلیان - رئیس محور دوم

۱- مقدمه

تعداد مقالات دریافتی برای این محور از دوازدهمین کنفرانس منطقه ای سیرد ایران، ۴۸ مورد بوده که پس از بررسی و داوری‌های مختلف، در نهایت ۱۶ مقاله مورد پذیرش قرار گرفته و ۳۲ مقاله نیز مردود گردیدند. به عبارت دیگر، پس از بررسی‌های کامل، یک سوم مقالات پذیرفته شده‌اند. با توجه به موضوعات مقالات پذیرفته شده، می‌توان آنها را براساس پدیده‌های کیفیت توانی در ۴ دسته به شرح ذیل دسته‌بندی نمود:

- اعوجاج شکل موج، هارمونیک‌ها و فیلتراسیون
- پدیده‌های گذرا و نوسانات ناشی از کلیدزنی
- انحرافات دامنه ولتاژ
- اغتشاشات ترکیبی و چندگانه

در ادامه گزارش، شرح مختصری از مقالات پذیرفته‌شده در هر یک از موضوعات فوق ارائه می‌شود:

۲- اعوجاج شکل موج، هارمونیک‌ها و فیلتراسیون

بیشترین مقالات پذیرش شده در این دسته قرار می‌گیرند. مقالات این دسته عموماً به بررسی تزریق جریان‌های هارمونیکی توسط بارهای غیرخطی (مبدل‌ها، روشنایی، موتورها) و راهکارهای حذف این اعوجاج‌ها از طریق فیلتراسیون و کنترل مبدل می‌پردازند. در ادامه خلاصه‌ای از مقالات این دسته ارائه می‌گردد.

۱-۲. مقاله ۱۰۶۴، یک راهکار سخت‌افزاری نوین تحت عنوان واحد جداساز فرکانس‌گزین (FIU) برای برقراری هم‌زیستی و سازگاری الکترومغناطیسی میان فیلترهای پسیو حذف هارمونیک و سیستم مخابراتی PLC در شبکه‌های هوشمند ارائه شده است. در این طرح، یک مدار رزونانس موازی LC به‌صورت سری با

فیلتر هارمونیک قرار می‌گیرد تا با ایجاد یک سد امپدانسی بالا در فرکانس حامل (۶۰ کیلوهرتز)، مانع از نشست و اتلاف سیگنال‌های مخابراتی در فیلتر شود. نتایج نشان می‌دهد که این ایده نه تنها اعوجاج هارمونیکی کل (THD) شبکه را به ۲/۶ درصد بهبود می‌بخشد، بلکه تضعیف شدید سیگنال مخابراتی را از ۱۴/۹۸ دسی‌بل به ۰/۹ دسی‌بل کاهش می‌دهد. به علاوه، تحلیل‌های آماری مبتنی بر روش مونت‌کارلو تأیید می‌کند که این ساختار در برابر عدم قطعیت‌ها و تفرانس قطعات سخت‌افزاری، دارای پایداری و مقاومت عملیاتی بالایی است.

۲-۲. مقاله ۱۳۴۲ موتورهای BLDC به‌عنوان جایگزینی برای موتورهای تکفاز کولرهای آبی بررسی شده‌اند. در این مقاله، سه سناریوی مختلف مدنظر بوده که شامل (۱) موتور تکفاز متداول (۲) موتور BLDC بدون PFC و (۳) موتور BLDC با PFC می‌باشد. هریک از این سه سناریو از لحاظ THD، هزینه اولیه و زمان بازگشت سرمایه مقایسه شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده که با وجود گرایش زیاد به استفاده از موتورهای BLDC، نوع بدون PFC این موتورها به مرور زمان باعث خسارت به سایر تجهیزات مشترک شده و نوع با PFC نیز هزینه اولیه و در نتیجه زمان بازگشت سرمایه زیادی دارد که باعث می‌شود مشترک نسبت به استفاده از این گزینه صرف نظر کند. بنابراین تغییر در رویکردها مورد نیاز است.

۳-۲. مقاله ۱۴۹۴ به بررسی تأثیر لامپ‌های LED بر کیفیت توان شبکه توزیع و ارائه راهکارهای کاهش آلودگی هارمونیکی می‌پردازد. هدف، تحلیل مشکلات ناشی از جریان غیرخطی لامپ‌های LED فاقد درایور استاندارد است. روش کار شامل اندازه‌گیری پارامترهای کیفیت توان چند نمونه لامپ LED و همچنین کنتور، تابلو برق و ترانسفورماتور یک مجتمع تجاری با بار غالب روشنایی در مشهد است. نتایج نشان می‌دهد THD

جریان لامپ‌های نمونه بین ۱۱۰ درصد تا ۱۲۸ درصد با هارمونیک سوم غالب است و در تابلو برق و ترانسفورماتور مجتمع، THD جریان و ولتاژ فراتر از محدوده مجاز قرار دارد. این وضعیت موجب افزایش جریان نول، تلفات، اشغال ظرفیت ترانسفورماتور و کاهش عمر تجهیزات می‌شود. راهکارها شامل الزام به لامپ‌های استاندارد، تعویض درایور، افزودن طبقه فیلتر و اعمال جریمه هارمونیکی ارائه شده است.

۴-۲. مقاله ۱۵۳۸ یک روش کنترلی هوشمند برای کاهش اعوجاجات هارمونیکی در مبدل‌های متصل به شبکه ارائه نموده است. در این مقاله، از یک مبدل PI در حوزه dq برای کنترل جریان، یک جبران‌ساز پیشخور مبتنی بر مدل RL جهت بهبود پاسخ دینامیکی و جبران اثرات کوپلینگ بین محورهای dq، میرایی مقاومتی مجازی برای جلوگیری از رزونانس بین فیلتر مبدل و امپدانس شبکه، جبران‌سازی PR برای تضعیف هارمونیک‌های منتخب و تزریق پیش‌بینانه رزونانسی برای تخمین روند تغییرات هارمونیک‌ها استفاده شده است. به علاوه، از یک لایه تطبیقی مبتنی بر حافظه برای تنظیم وزن بهره‌ها استفاده شده است.

۵-۲. مقاله ۱۵۶۳ یک ساختار مبدل ایزوله به همراه فیلتر EMI دوگانه ارائه داده است که هدف آن، بهبود کیفیت توان مبدل و کاهش تداخلات الکترومغناطیسی می‌باشد. فیلتر این ساختار از دو زیر-فیلتر مد مشترک و مد تفاضلی تشکیل شده است که تداخلات الکترومغناطیسی بین ۱۵۰kHz تا ۳۰MHz را فیلتر می‌کند. نتایج عملی حاصل از این مقاله نشان می‌دهد که با استفاده از فیلتر پیشنهادی، شاخص THD که در حالت بدون فیلتر برابر ۷۸ درصد بوده، به مقدار ۱/۸۶ درصد کاهش یافته که نشان از عملکرد مطلوب فیلتر پیشنهادی دارد.

۶-۲. مقاله ۱۵۷۱، یک راهبرد کنترل مدرن مبتنی بر مدل‌سازی فضای حالت برای یکسوکننده‌های سه‌فاز متصل به شبکه (SVPWM) ارائه نموده که هدف آن غلبه بر ضعف پاسخ دینامیکی کنترل‌کننده‌های کلاسیک در شرایط تغییرات ناگهانی بار است. در این راهبرد، به جای استفاده از کنترل‌کننده مرسوم تناسبی-انترگال‌گیر (PI) در قاب مرجع سنکرون dq، معادلات حاکم بر مبدل حول نقطه کار خطی‌سازی شده و از رویکرد

کنترلی فیدبک حالت بهره گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که جابجایی مناسب قطب‌ها در این ساختار کنترلی، ضمن حفظ پایداری و کاهش چشمگیر نوسانات ولتاژ لینک DC در هنگام اعمال پله‌ای بار، توانسته اعوجاج هارمونیکی کل (THD) جریان شبکه را از ۳/۸ درصد (در روش کلاسیک) به ۰/۷۲ درصد تقلیل دهد.

۷-۲. مقاله ۱۶۰۸، یک راهبرد کنترل پیش‌بین تطبیقی (Adaptive MPC) به منظور ارتقای کیفیت توان در شارژرهای دو جهته خودروی برقی (V_g/G_v) ارائه نموده است. این ساختار کنترلی با بهره‌گیری از یک تخمین‌گر حالت تطبیقی برای استخراج دقیق مؤلفه‌های شبکه و یک تابع هزینه چندهدفه، بردار کلیدزنی بهینه را با هدف کمینه‌سازی خطای توان، مهار نوسانات ولتاژ لینک DC و کاهش اعوجاج جریان تعیین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در مقایسه با روش کنترل توان مستقیم (DPC)، الگوریتم پیشنهادی حتی در حضور اغتشاشات و هارمونیک‌های ولتاژ شبکه، علاوه بر بهبود ضریب توان و کاهش زمان نشست به ۴۰ میلی‌ثانیه، توانسته THD جریان را در حالت شارژ از ۳/۸ درصد به ۰/۶ درصد کاهش دهد.

۸-۲. مقاله ۱۷۸۵ یک روش مبتکرانه مبتنی بر یادگیری ماشین بدون نظارت (الگوریتم‌های Isolation Forest و DBSCAN) برای شناسایی و دسته‌بندی منابع هارمونیک ارائه می‌دهد که به جای استفاده از آنالیزهای گران‌قیمت، صرفاً از داده‌های موجود کنترلهای هوشمند (AMI) استفاده می‌کند. نوآوری دیگر پژوهش، معرفی شاخصی جدید به نام HCI است که سهم هر منبع را در آلودگی هارمونیکی به صورت کمی رتبه‌بندی می‌کند. نتایج ارزیابی روی داده‌های واقعی ۴۸۷ پست توزیع در مشهد نشان داد که روش پیشنهادی با دقت ۸۹ درصد موفق به شناسایی ۶۳ منبع اصلی شده است. بر اساس شاخص HCI، تنها ۸ منبع، عامل ۶۷ درصد از کل آلودگی‌ها تشخیص داده شدند که با نصب فیلتر در همین نقاط اولویت‌دار، THDv به میزان ۵۷ درصد بهبود یافت.

۹-۲. مقاله ۱۸۱۲ برای حل چالش افزایش مخرب جریان نول ناشی از بارهای غیرخطی، یک رویکرد نوآورانه در جابجایی فیلتر

ارائه می‌دهد؛ به گونه‌ای که به جای نصب فیلتر در خود پست توزیع، یک فیلتر هیبرید هارمونیک مرتبه ۳ را دقیقاً در سطح فیدر (به طور بهینه در ابتدای فیدرها) و نزدیک‌تر به مصرف‌کننده طراحی و جابجایی کرده است. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار DigSILENT بر مبنای داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در شبکه سیرجان نشان می‌دهد که این ایده علاوه بر کوچک‌تر شدن اندازه فیلتر و توجیه اقتصادی، توانسته هارمونیک مرتبه سوم جریان در سیم نول خروجی ترانسفورماتور را حدود ۹۷ درصد کاهش دهد. این پالایش موفق جریان، در نهایت منجر به افت چشمگیر ۴۰ درصدی در مقدار کل جریان عبوری از سیم نول شبکه شده است.

۳- پدیده‌های گذرا و نوسانات ناشی از کلیدزنی

مقالات این دسته بر روی پدیده‌های گذرای نوسانی با فرکانس بالا ناشی از قطع و وصل اجزای شبکه و استرس‌های دی‌الکتریک لحظه‌ای تمرکز دارند. خلاصه مقالات این دسته به صورت زیر است.

۱-۳. مقاله ۱۲۲۶ به تحلیل و کاهش گذراهای کلیدزنی بانک‌های خازنی فشار متوسط در شبکه توزیع قزوین می‌پردازد. هدف این مقاله، طراحی هماهنگ چند بانک خازنی با راکتورهای دی‌تیون و مقاومت پیش‌درج است تا ضمن حفظ پروفیل ولتاژ، تشدید هارمونیک و تنش‌های کلیدزنی پشت‌به‌پشت محدود شود. روش کار شامل مدل‌سازی شبکه در نرم افزار DigSILENT PowerFactory، پخش بار، جاروب فرکانسی، پخش بار هارمونیک و شبیه‌سازی گذراست. نوآوری اصلی، تنظیم ناهمسان راکتورها در بانک‌های مجاور برای جلوگیری از تمرکز فرکانس‌های طبیعی و لندرنش نامطلوب است. نتایج نشان می‌دهد افزودن راکتور دی‌تیون جریان هجومی را حدود ۷۱ درصد کاهش می‌دهد اما ولتاژ را بالا می‌برد؛ استفاده هم‌زمان مقاومت پیش‌درج، ولتاژ و جریان گذرا را به ترتیب به حدود ۱/۲۱ و ۲/۱۴ پروینیت می‌رساند. طراحی نهایی، اعوجاج هارمونیک را در محدوده مجاز نگه می‌دارد و نشان می‌دهد انتخاب هماهنگ راکتورها و تجهیزات محدودکننده برای بهره‌برداری مطمئن شبکه‌های توزیع با چند بانک خازنی ضروری است.

۲-۳. مقاله ۱۴۸۰ به بررسی اضافه‌ولتاژهای ناشی از کلیدزنی خاموشی‌های مدیریت اضطراری بار و تأثیر آن بر سوختن لوازم برقی مشترکین می‌پردازد. انگیزه این پژوهش، بررسی ۱۸۴ پرونده خسارت در نهانود طی سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ است که ۷۵ درصد آن به کلیدزنی شبکه مربوط می‌شود. هدف، مقایسه اضافه‌ولتاژهای ناشی از قطع کلید خلاً (VCB) ابتدای فیدر با سکسیونر SF₆ در طول فیدر است. روش کار شامل مدل‌سازی فیدر نمونه ۲۰ کیلوولت به طول ۱۰ کیلومتر در EMTP-RV و بررسی دو سناریوی قطع کل فیدر با VCB و قطع بخشی از فیدر با SF₆ است. پدیده‌های مؤثر شامل TRV، برش جریان، باز اشتعال، پیش جرقه و قوس مجدد بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد پیک TRV در قطع VCB هنگام عبور از صفر، ۳۰ کیلوولت و با برش جریان ۳ آمپر، ۴۰۷ کیلوولت است؛ در حالی که قطع SF₆ در طول فیدر به ترتیب ۲۶/۷ و ۳۵/۵ کیلوولت ایجاد می‌کند. بنابراین کلیدزنی با سکسیونر SF₆ در طول فیدر، اضافه‌ولتاژ کمتری نسبت به VCB ابتدای فیدر تولید می‌کند و آسیب کمتری به لوازم مشترکین وارد می‌سازد. مقاله توصیه می‌کند در مدیریت اضطراری بار، ابتدا قطع کنتورهای فها و لایه فشار ضعیف ترجیح داده شود و در صورت نیاز به قطع فیدر فشار متوسط، سکسیونر SF₆ در طول فیدر بر VCB ابتدای فیدر ارجحیت دارد.

۴- انحرافات دامنه ولتاژ

مقالات این دسته شامل پژوهش‌هایی است که پدیده‌های مرتبط با تغییرات RMS ولتاژ، شامل اضافه‌ولتاژهای ملندگار، افت ولتاژها و تنظیم پروفیل ولتاژ شبکه را بررسی می‌کنند. در ادامه خلاصه‌ای از مقالات این دسته ارائه می‌شود.

۱-۴. مقاله ۱۱۴۹، یک راهبرد کنترل ثانویه توزیع شده مبتنی بر کنترل دروپ تطبیقی (Adaptive Droop) برای ریزشبکه‌های LVAC در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای ارائه شده است. نوآوری اصلی این روش در آن است که برای جبران انحرافات، به جای استفاده از کنترل‌کننده مرکزی و ضرایب دروپ ثابت (که در روش‌های متداول مرسوم است)، ضرایب مجازی دروپ مرتبط با مشخصه‌های P-f و Q-v به صورت برخط و تطبیقی و بر پایه تبادل اطلاعات توزیع شده میان واحدهای تولید پراکنده تنظیم

ثابت با رگولاتورهای ولتاژ اتوماتیک جایگزین شوند تا ولتاژ در تمامی ساعات شبانه‌روز در محدوده استاندارد حفظ گردد.

۵- اغتشاشات ترکیبی و چندگانه

این دسته به مقالاتی اختصاص دارد که روی یک پدیده خاص متمرکز نیستند، بلکه ترکیبی از چند اغتشاش کیفیت توانی (مثل همزمانی فلیکر، هارمونیک، نامتعادلی و افت ولتاژ) را مدل‌سازی یا شناسایی می‌کنند. در ادامه خلاصه‌ای از مقالات این دسته ارائه می‌گردد.

۱-۵. مقاله ۱۳۶۸ به شناسایی هوشمند مزارع استخراج رمزارز در شبکه‌های توزیع با شبکه عصبی مصنوعی (MLP) و تلفیق شاخص‌های پروفایل بار و کیفیت توان می‌پردازد. هدف، تشخیص بارهای غیرمجاز استخراج رمزارز است که تلفات و اعوجاج هارمونیکی ایجاد می‌کنند. روش‌های متداول مبتنی بر پایش انرژی در برابر دستکاری الگوی مصرف کارایی محدودی دارند؛ بنابراین ویژگی‌هایی مانند ضریب بار، نسبت شب به روز، ضریب توان و THD به‌عنوان ورودی شبکه عصبی برای طبقه‌بندی مشترکین در سه کلاس عادی، مشکوک و غیرمجاز استفاده شده‌اند. ارزیابی در دو بستر انجام شده است: شبیه‌سازی روی شبکه IEEE ۳۳-bus با تزریق بارهای مابینینگ در چهار گره، و مطالعه میدانی در شبکه توزیع گلستان با داده‌های AMI و دستگاه ۹۰۲ UnitPower نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد این مدل، حداقل ۳ گره از ۴ گره آلوده را درست شناسایی می‌کند. در شبکه واقعی، دقت کلی ۹۲ درصد، نرخ تشخیص صحیح ۹۵ درصد و نرخ مثبت کاذب ۷ درصد به دست آمده است. مقله تأکید دارد ترکیب هم‌زمان ویژگی‌های رفتاری و الکتریکی، دقت بالاتری از روش‌های صرفاً آماری یا انرژی‌محور فراهم می‌کند و می‌تواند ابزاری عملی برای کاهش تلفات و ارتقای پایش شرکت‌های توزیع باشد.

۲-۵. مقاله ۱۸۱۴، با هدف حل مشکل کمبود داده‌های واقعی و کافی برای آموزش مدل‌های تشخیص اغتشاشات کیفیت توان، یک روش ریاضی مبتنی بر ترکیب توابع کاپیولا (Copula) و استنتاج بیزین ارائه می‌دهد. نوآوری اصلی این مقاله، در استفاده از این روش برای تولید داده‌های مصنوعی (مثل گذرای ضربه) با خطای وابستگی بسیار کم و بدون نیاز به جمع‌آوری پرهزینه

می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی در محیط MATLAB نشان می‌دهد که این سازوکار تطبیقی توانسته است در سناریوهای مختلف تغییر بار، ضمن بازیابی سریع و دقیق ولتاژ و فرکانس به مقادیر نامی، اشتراک توان اکتیو و راکتیو را میان واحدهای تولید پراکنده با دقت بالایی حفظ کند.

۲-۴. مقاله ۱۳۲۲ به بازآرایی بهینه فیدر ۱۱ آبشار در شبکه توزیع اصفهان با الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و با تأکید بر الزامات توپولوژیکی و بهره‌برداری واقعی می‌پردازد. هدف این مقاله، کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ بدون توسعه فیزیکی شبکه است، اما آرایش نهایی باید شعاعی بودن، تأمین کامل بار، حدود ولتاژ و محدودیت‌های فیدرهای مجاور را نیز برآورده کند. مدل شامل ۵۶ باس و ۵۳ خط در pandapower با ۷ کلید Tie و ۴۵ سکشنالایزر است که ۳۱۵ ترکیب ممکن می‌سازد. حالت پلایه دارای تلفات ۴۷۸/۶ کیلووات و حداقل ولتاژ ۰/۹۳۶۵ پریونیت است. محدودیت واقعی فیدر ۶ فجر و کلید S-۱۸۵۰ باعث حذف ۱۶ آرایش می‌شود و ۷۴ آرایش معتبر باقی می‌ماند. بهترین آرایش با بستن S-۱۲۴۵ و بازکردن SEC_۱۳۴۰-۱۳۲۸، تلفات را به ۴۱/۵ کیلووات کاهش می‌دهد (۹۱/۳ درصد کاهش) و حداقل ولتاژ را به ۰/۹۷۴۰ پریونیت می‌رساند. مقله نشان می‌دهد آرایش‌های کم‌تلفات وابسته به S-۱۸۵۰ به دلیل نقض محدودیت فیدر مجاور پذیرفته نمی‌شوند و بر تعریف صحیح قیود و اعتبارسنجی مستقل تأکید می‌شود.

۳-۴. مقله ۱۷۶۵ به بررسی پدیده افزایش ولتاژ در فیدرهای طویل کشاورزی/روستایی در کشور ایران می‌پردازد که به‌دلیل هم‌زمانی قطع بار پمپ‌های کشاورزی در ساعات پیک روز (۱۱:۳۰ تا ۱۶:۳۰) و تولید حداکثری پنل‌های خورشیدی تک‌فاز رخ می‌دهد. شبیه‌سازی یک فیدر واقعی ۳۵ کیلومتری نشان داد که در شرایط بحرانی ظهر، ولتاژ انتهای خط می‌تولند تا ۱/۱۱ پریونیت افزایش یابد که فراتر از حد مجاز شبکه است. دلیل اصلی این اضافه‌ولتاژ، وجود اتوترانسفورماتورهای ثابت در میانه خط است که برای جبران افت ولتاژ در پیک شبانه تنظیم شده‌اند و در شرایط کمباری، ولتاژ را بیش‌ازحد بالا می‌برند. برای حل این چالش، پژوهش حاضر پیشنهاد می‌کند که در کوتاه‌مدت از قطع چرخشی بارهای کشاورزی (حداکثر ۳۳ درصد قطع هم‌زمان در یک فیدر) استفاده شود و در میان‌مدت، اتوترانسفورماتورهای

نمونه‌های واقعی است. نتایج نشان می‌دهد با انتخاب کاپیولای مناسب (نرمال یا گامبل) برای متغیرهای میانگین و انحراف معیار، می‌توان حتی با مجموعه داده‌های کوچک یا متوسط (ده برابر کوچکتر از دیتای بزرگ)، نمونه‌های جدیدی با حفظ دقیق وابستگی‌های ساختاری داده اصلی تولید کرد. این دستاورد چالش آموزش الگوریتم‌های طبقه‌بندی کیفیت توان را با داده‌های محدود برطرف می‌سازد.

جمع‌بندی

با توجه به مجموع مقالات پذیرفته شده در این محور، به نظر می‌رسد بیشتر مقالات حول محور هارمونیک‌ها بوده و برای سایر پدیده‌های کیفیت توانی مانند فروافتادگی ولتاژ، نامتعادلی و فلیکر مقالات کمتری ارسال شده است. این موضوع می‌تواند در سطح شرکت‌های توزیع مطرح و ریشه‌یابی گردد تا علت عدم رویکرد کارشناسان شرکت‌های توزیع به این مباحث مشخص شود. همچنین با توجه به افزایش کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل داده‌ها، بهتر است شرکت‌های توزیع تمرکز بیشتری بر روی استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل و عیب‌یابی خطاها و پدیده‌های شبکه توزیع داشته باشند. به علاوه، دستگاه‌های استخراج رمزارز که به‌طور غیرقانونی فعالیت دارند نیز از جمله معضلات حاد شرکت‌های توزیع می‌باشند که می‌بایست بیشتر مورد توجه قرار گیرند.