

تحلیل بهینه و شبیه سازی ادوات توزیع شده D-FACTS در خطوط انتقال نیرو با رویکرد بهبود پایداری و بهره وری شبکه های قدرت

نام و نام خانوادگی طیبه قلیچ پور^{۱*}، مهدیه اسلامی^۲

چکیده

با افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی الکتریکی و محدودیت های توسعه زیرساخت های انتقال، بهره گیری از راهکارهای هوشمند و کم هزینه برای افزایش ظرفیت و پایداری شبکه های قدرت اهمیت ویژه ای یافته است. در این میان، ادوات انعطاف پذیر توزیع شده کنترل جریان توان به عنوان یکی از فناوری های نوین، با نصب مستقیم بر روی هادی های موجود، امکان کنترل و جبران جریان توان را بدون نیاز به ایجاد تغییرات اساسی در پست های انتقال فراهم می سازند. در این پژوهش، تأثیر به کارگیری تعداد محدودی از این ادوات بر عملکرد فنی و اقتصادی خطوط انتقال، با استفاده از نرم افزار شبیه ساز پاورورلد (Power World Simulator) و داده های واقعی شبکه WECC، بررسی شده است. تحلیل ها در سه وضعیت حالت پایه، معیار امنیت N-1 و معیار امنیت N-2 انجام شد تا اثر خرابی های احتمالی خطوط و شین ها بر بارگذاری و توزیع توان مشخص شود. نتایج نشان داد استفاده بهینه از این ادوات می تواند بارگذاری خطوط بحرانی را از ۹۷٫۵٪ به کمتر از ۹۵٪ ظرفیت نامی کاهش دهد و در شرایط خرابی دوگانه، این میزان از ۹۶٪ به حدود ۹۱٪ تنزل یابد. همچنین در مطالعه شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE، نصب تدریجی ماژول ها افزایش ظرفیت انتقال تا حدود ۳۳/۵٪ را به همراه داشت. ضرایب القایی به کاررفته بین ۴۷ تا ۱۰۵٫۷ میکروهنری و در محدوده مجاز عملکرد خطوط بوده اند. از منظر اقتصادی، نصب تعداد بهینه این ادوات نسبت به احداث خطوط جدید، کاهش هزینه ای نزدیک به ۲۰٪ و کاهش تلفات توان تا ۸٪ را نشان داد. این نتایج مؤید آن است که به کارگیری هدفمند این ادوات علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان و پایداری دینامیکی، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است.

دریافت مقاله: ۲۴/۰۸/۱۴۰۴

پذیرش مقاله: ۲۷/۰۹/۱۴۰۴

کلمات کلیدی: ادوات D-FACTS، جبران سازی سری توزیع شده، پایداری شبکه قدرت، شبیه سازی Power World، سامانه WECC، بهینه سازی بهره برداری، افزایش ظرفیت انتقال

۱- مقدمه^۱

قابل بهره برداری سیستم می شود، به گونه ای که الزامات قابلیت اطمینان N-1 حاشیه ایمنی بالایی را تحمیل می کند. در این راستا، ادوات FACTS و به ویژه نسل توزیع شده آن ها (D-FACTS)، با نصب مستقیم بر خطوط موجود و اعمال راکتانس کنترلی، امکان مدیریت جریان توان و بهره برداری بهینه از ظرفیت شبکه را با هزینه کمتر و بدون نیاز به توسعه پست ها فراهم می کنند [۱]. با رشد بارگذاری شبکه های انتقال، بهره گیری از روش های نوین برای افزایش ظرفیت و پایداری اهمیت فزاینده ای یافته است. ادوات انعطاف پذیر توزیع شده کنترل جریان توان به عنوان فناوری جبران سازی پیشرفته خطوط انتقال، قادرند جریان و توان عبوری از خطوط را به صورت لحظه ای تنظیم کرده

شبکه های انتقال نیروی الکتریکی با چالش هایی نظیر فرسودگی زیرساخت ها، رشد تقاضای انرژی و محدودیت های زیست محیطی و اجتماعی در توسعه خطوط جدید مواجه اند. بسیاری از این شبکه ها، از جمله شبکه WECC، قدیمی بوده و افزایش بارگذاری خطوط موجود، آسیب پذیری سیستم را در برابر خاموشی ها افزایش داده است. مخالفت های اجتماعی با احداث خطوط جدید نیز توسعه زیرساخت ها را پرهزینه و زمان بر کرده است. در شبکه های توری، عدم امکان کنترل مستقیم مسیر جریان توان موجب بارگذاری نامتوازن خطوط و کاهش ظرفیت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: tayebeghelichpour@gmail.com

۱. گروه برق، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

این قابلیت می‌تواند ضمن کاهش تراکم خطوط بحرانی، پاسخ مناسبی به رخدادهای اضطراری نظیر خروج خطوط یا واحدهای تولیدی ارائه داده و کیفیت توان و قابلیت اطمینان بهره‌برداری شبکه را بهبود بخشد [۱۱]. در ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان، پارامتر اصلی برای هدایت مسیر شارش توان، خودالقایی سری قابل کنترل است. با افزایش مقدار این خودالقایی، جریان عبوری از خط کاهش یافته و بخشی از توان به مسیرهای موازی منتقل می‌شود [۱۲]. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که این شیوه کنترل می‌تواند بهره‌برداری از خطوط انتقال را بهینه ساخته، اتلاف توان را کاهش دهد، پروفیل ولتاژ را در محدوده مجاز حفظ کند و ظرفیت مؤثر شبکه را افزایش دهد [۱۱].

افزودن این ادوات به خطوط انتقال، موجب بازتوزیع مسیرهای جریان توان و افزایش قابل توجه ظرفیت سیستم می‌شود [۱۰]. در مدل استاندارد شبکه ۳۹ باس IEEE، نصب ماژول‌های ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان بر روی ۹ خط بحرانی، افزایش ظرفیت بیشینه شبکه تا حدود ۳۳٫۵ درصد را به همراه داشته است [۱۳]. همچنین، مطالعات نشان می‌دهد به کارگیری این ادوات منجر به افزایش ظرفیت انتقال و بهبود شرایط بهره‌برداری شبکه می‌شود [۱۳]. در تحلیل‌های مبتنی بر معیار امنیت N_1 ، ظرفیت سیستم با نصب این ادوات به حدود ۲۳۳۹ مگاوات افزایش یافته است که در مقایسه با حالت بدون استفاده از آن‌ها، رشد قابل توجهی را نشان می‌دهد [۱۴]. این افزایش ظرفیت، به طور مستقیم سبب ارتقای قابلیت اطمینان و امنیت عملکرد شبکه انتقال شده است [۱۵].

مطالعات انجام‌شده بر روی مدل استاندارد شبکه ۳۹ باس IEEE نشان می‌دهد که با نصب تدریجی ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان بر روی خطوط بحرانی، ظرفیت انتقال کل سیستم به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. در این شرایط، میزان بهره‌برداری از خطوط انتقال از حدود ۵۹ درصد به ۹۳٫۳ درصد افزایش یافته و توان شبکه بدون نیاز به احداث خطوط جدید، به طور مؤثر بازتوزیع می‌شود. این نتایج بیانگر آن است که کنترل موضعی راکتانس توسط این ادوات، علاوه بر افزایش ظرفیت مؤثر انتقال، موجب بهبود قابلیت اطمینان و پایداری عملکرد شبکه نیز می‌شود [۱۳]. در حوزه کاربردهای صنعتی، شرکت Smart Wires یکی از تولیدکنندگان شاخص ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان است که واحدهای موسوم به Powerline Guardian را ارائه می‌کند [۱۶]. این تجهیزات، راکتورهای سری توزیع‌شده‌ای هستند که مستقیماً بر روی هادی‌های خطوط انتقال نصب شده و قابلیت اعمال راکتانس سری، کنترل اضافه‌بار، کاهش تراکم خطوط و پایش وضعیت

و مسیرهای شارش بار را متعادل سازند. بهره‌برداری بهینه از تعداد محدودی از این ادوات می‌تواند بدون نیاز به توسعه فیزیکی شبکه، منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت انتقال، بهبود پایداری در شرایط اضطراری و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری شود. در این پژوهش، عملکرد شبکه هماهنگی الکتریکی غرب آمریکا (WECC) با نصب بهینه این ادوات و با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی پاورورد مورد تحلیل قرار گرفته است. سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر به خانواده‌ای از ادوات مبتنی بر الکترونیک قدرت اطلاق می‌شود که با هدف افزایش قابلیت کنترل‌پذیری و پایداری شبکه‌های جریان متناوب، توان انتقال نیرو را بهبود می‌بخشند [۲]. این ادوات با ترکیب عناصر متداول سیستم قدرت، از جمله مبدل‌ها، راکتورها و خازن‌ها، به همراه عناصر نیمه‌هادی نظیر ترانزیستورها و تریستورها طراحی شده‌اند. افزایش توان نامی ادوات نیمه‌هادی در سال‌های اخیر، امکان استفاده از این فناوری را در کاربردهای توان بالا تا چند هزار مگاوات فراهم کرده است [۳].

به دلیل سرعت پاسخ بالا و انعطاف‌پذیری عملکرد، این ادوات مزایای متعددی از جمله افزایش ظرفیت خطوط انتقال، کنترل مسیر شارش توان، بهبود پایداری گذرا، میرایی نوسانات و حفظ ولتاژ در محدوده مجاز ارائه می‌کنند [۴]. با این حال، عواملی نظیر هزینه سرمایه‌گذاری بالا، پیچیدگی ساخت و محدودیت‌های مربوط به قابلیت اطمینان، مانع از به کارگیری گسترده این فناوری در شبکه‌های انتقال شده‌اند [۵]. ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان نسل جدیدی از این فناوری محسوب می‌شوند که ضمن ارائه عملکرد مشابه، از ابعاد کوچک‌تر، هزینه کمتر و قابلیت اطمینان بالاتری برخوردارند [۶]. این تجهیزات به طور مستقیم بر روی هادی‌های خطوط انتقال نصب می‌شوند و با اعمال راکتانس سری قابل کنترل، مسیر شارش توان و بارگذاری خطوط را تنظیم می‌کنند [۷]. ساختار پیمانه‌ای و افزایشی این ادوات، امکان نصب تدریجی، توسعه‌پذیری و جابه‌جایی آسان را بدون نیاز به فضای اضافی در ایستگاه‌های فرعی فراهم می‌سازد [۸].

مزیت اصلی این فناوری، کاهش تراکم بار خطوط، بهبود پایداری شبکه، بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ و بهره‌برداری حداکثری از ظرفیت موجود شبکه انتقال است [۹]. از دیدگاه اقتصادی، نتایج گزارش‌شده نشان می‌دهد که به جای احداث حدود ۲۰ مایل خط انتقال جدید با هزینه‌ای در حدود ۲۰ میلیون دلار، می‌توان با نصب تقریبی ۲۰۰۰ واحد از این ادوات، ظرفیت انتقال و پایداری کل شبکه را به طور مؤثری ارتقا داد [۸]. کنترل شارش توان به فرآیند تغییر راکتانس مؤثر خط یا تزریق ولتاژ سری با هدف هدایت مسیر جریان توان در شبکه انتقال اطلاق می‌شود [۱۰].

راکتانس خط یا حداکثر ۳۰ واحد به ازای هر فاز نیز در طراحی و بهره‌برداری این ادوات مطرح است [۲۰].

در جدول ۱، مقایسه‌ای میان مطالعات پیشین و پژوهش حاضر در زمینه به‌کارگیری فناوری‌های ادوات انعطاف‌پذیر انتقال، ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان و تجهیزات شرکت Smart Wires ارائه شده است. معیارهای این مقایسه شامل نوع فناوری مورد استفاده، انجام شبیه‌سازی عددی، کاربرد بر روی شبکه واقعی هماهنگی الکتریکی غرب آمریکا، مدل‌سازی ادوات توزیع‌شده، افزایش ظرفیت مؤثر انتقال، تحلیل‌های امنیتی N-1 و N-2 و همچنین ارزیابی اقتصادی است. نتایج نشان می‌دهد که اغلب مطالعات پیشین تنها بخشی از این معیارها را پوشش داده‌اند، در حالی که پژوهش حاضر با در نظر گرفتن هم‌زمان تمامی این جنبه‌ها، به‌ویژه استفاده از شبکه واقعی و انجام تحلیل جامع فنی-اقتصادی، رویکردی کامل‌تر و کاربردی‌تر ارائه می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه پژوهش حاضر و مطالعات پیشین

Smart Wires	تحلیل اقتصادی	N-2 تحلیل	N-1 تحلیل	افزایش ATC	D-FACTS مدل	شبیه‌سازی عددی	شبکه واقعی / WECC	رفرنس‌ها
X	X	X	X	✓	X	✓	X	[۲-۵]
X	X	X	X	✓	✓	✓	X	[۶، ۷]، [۱۲-۱۰]
X	✓	X	X	✓	✓	✓	X	[۸]
X	X	X	✓	✓	✓	✓	X	[۱۳-۱۵]
✓	✓	X	X	✓	✓	X	X	[۱۶، ۱۷]
✓	X	X	X	X	✓	X	X	[۱۸-۲۰]
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	پژوهش حاضر

خطوط را فراهم می‌کنند [۱۶]. زمان نصب این ادوات معمولاً کمتر از یک ماه بوده و طول عمر بهره‌برداری آن‌ها بیش از ۲۰ سال برآورد شده است [۱۷].

این ادوات از طریق ارتباطات بی‌سیم مبتنی بر شبکه‌های محلی بی‌سیم و سامانه‌های مخابرات سیار به مرکز کنترل متصل می‌شوند [۱۸]. اگرچه این ساختار ارتباطی موجب سهولت نصب و بهره‌برداری می‌شود، اما می‌تواند مخاطرات امنیت سایبری را افزایش دهد [۱۹]. به همین دلیل، در سامانه‌های کنترلی این تجهیزات از پروتکل‌های رمزنگاری با کلید ۲۵۶ بیتی برای جلوگیری از نفوذهای غیرمجاز استفاده می‌شود [۱۹]. با وجود مزایای فنی و اقتصادی فراوان، ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان با محدودیت‌هایی نیز همراه هستند. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به هزینه بالای نصب تعداد زیاد واحدها، وزن قابل توجه هر دستگاه و اثرات مکانیکی ناشی از آن بر خطوط انتقال (مانند تغییر کشش هادی‌ها در فصول گرم) اشاره کرد. همچنین، محدودیت‌های عملیاتی نظیر حداکثر ۳۰ درصد تغییر

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۱، پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین از رویکردی جامع‌تر برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که در کنار استفاده از مدل واقعی شبکه و ابزار شبیه‌سازی پیشرفته، سناریوهای مختلف بهره‌برداری و رخدادهای احتمالی نیز به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ترکیب تحلیل‌های فنی، اقتصادی و پایداری، همراه با بهینه‌سازی محل و تعداد ادوات D-FACTS، موجب شده است نتایج این تحقیق از نظر قابلیت اطمینان، بهره‌وری شبکه و امکان پیاده‌سازی عملی، متمایز و قابل اتکا باشد.

۲- مدل ریاضی شارش نیرو با حضور ادوات D-FACTS

ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان به‌عنوان راکتورهای سری توزیع‌شده، با اعمال راکتانس‌های موضعی کوچک در مسیر خطوط انتقال، امکان کنترل مستقیم شارش توان اکتیو در شبکه را فراهم می‌کنند. این ادوات با ایجاد تغییرات جزئی در مقدار راکتانس هر خط X_{ij} ، مسیر انتقال توان را میان

۴- ضریب بهره‌برداری خط:

$$\eta_{line} = \frac{P_{ij}}{P_{thermal}}, \quad \eta'_{line} = \frac{P'_{ij}}{P_{thermal}} \quad (4)$$

در این رابطه $P_{thermal}$ حد توان حرارتی مجاز خط است. افزایش η_{line} نشان دهنده‌ی استفاده‌ی بهینه از زیرساخت بدون افزودن خطوط جدید است.

فرم ماتریسی شارش نیرو برای کل شبکه:

$$P = B' \delta \quad (5)$$

که در آن ماتریس B' نمایانگر ماتریس ادمیتانس سری شبکه با لحاظ (X'_{ij}) است، و نصب D-FACTS به‌طور مستقیم امان‌های آن را اصلاح می‌کند:

$$B'_{ij} = -\frac{1}{X_{ij} + \Delta X_{D-FACTS}}, \quad B'_{ii} = -\sum_{j \neq i} B'_{ij} \quad (6)$$

خلاصه کارکرد ریاضی:

با ورود $\Delta X_{D-FACTS}$ به معادلات شارش نیرو، مسیرهای دارای تراکم بازتوزیع بار پیدا کرده و ماتریس ادمیتانس شبکه اصلاح می‌شود؛ در نتیجه، هم ظرفیت انتقالی و هم پایداری گذرای سیستم بهبود می‌یابد نتایجی که در مدل WECC و شبیه‌سازی Power World 19 نیز به‌صورت عددی تکرار و تأیید شده‌اند.

۳- تحلیل نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد D-FACTS در شرایط بحرانی شبکه قدرت

در این پژوهش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر روی مدل جامع شبکه WECC با استفاده از نرم‌افزار پاورورلد ارائه و تحلیل می‌شود. ارزیابی‌های انجام‌شده در دو بخش اصلی سازمان‌دهی شده‌اند؛ به‌گونه‌ای که در بخش نخست، تحلیل حالت پایدار به‌منظور بررسی بهبود ظرفیت کلی شبکه مورد استفاده قرار گرفته و در بخش دوم، تحلیل‌های معیار امنیت N-1 و N-2 با هدف ارزیابی افزایش قابلیت اطمینان و پایداری شبکه انجام شده است.

۳-۱- نتایج حالت پایه

نصب D-FACTS سبب افزایش ظرفیت انتقال از ۱۹۰۴ مگاوات به ۲۵۴۲ مگاوات شد که بیانگر رشد ۳۳/۵ درصدی است. مطابق جدول ۲ که خلاصه ظرفیت بارگذاری خطوط را پیش و پس از نصب ادوات نشان می‌دهد، توزیع توان میان خطوط یکنواخت‌تر شده و فشار

خطوط موازی بازتوزیع کرده و در نتیجه، بهره‌برداری از شبکه را به مقادیر نزدیک به حالت بهینه سوق می‌دهند. مدل‌سازی ریاضی این فناوری مبتنی بر اصول کلاسیک شارش بار است؛ به‌گونه‌ای که در آن، هر خط بین دو باس i و j به‌صورت یک راکتانس سری در نظر گرفته می‌شود.

با حضور ادوات انعطاف‌پذیر توزیع‌شده کنترل جریان توان، این پارامتر که پیش‌تر مقداری ثابت داشت، به یک متغیر قابل کنترل تبدیل می‌شود و بدین ترتیب، امکان هدایت فعال شارش توان در شبکه فراهم می‌گردد. بر اساس نتایج گزارش‌شده [۱۳]، اعمال این راهبرد کنترلی در مدل استاندارد شبکه ۳۹ باس IEEE موجب افزایش ظرفیت انتقال سیستم تا حدود ۳۳،۵ درصد شده و ضریب بهره‌برداری از خطوط انتقال را از حدود ۵۹ درصد به ۹۳/۳ درصد ارتقا داده است. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل موضعی و توزیع‌شده راکتانس، نقشی مؤثر در افزایش ظرفیت انتقال، بهبود بهره‌برداری از شبکه و کاهش نیاز به توسعه فیزیکی زیرساخت‌های انتقال ایفا می‌کند.

۱-۲- فرمول‌های پایه مدل

رابطه کلی توان اکتیو انتقالی بین دو باس:

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (1)$$

در این رابطه V_i و V_j ولتاژهای دو باس، X_{ij} راکتانس خط و $(\delta_i - \delta_j)$ اختلاف زاویه فاز دو باس را نشان می‌دهد.

تغییر راکتانس سری در حضور D-FACTS:

$$X'_{ij} = X_{ij} + \Delta X_{D-FACTS} \quad (2)$$

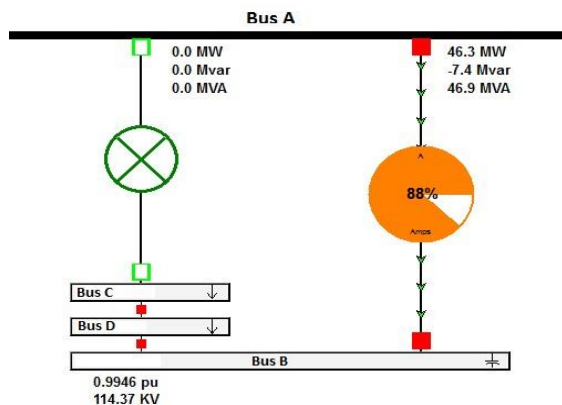
که در آن $\Delta X_{D-FACTS}$ راکتانس افزوده‌شده توسط واحد D-FACTS است که معمولاً در محدوده‌ی چند ده میکروهنری در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

توان انتقالی جدید پس از نصب D-FACTS:

$$P'_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{ij} + \Delta X_{D-FACTS}} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3)$$

طبق این رابطه، افزایش راکتانس در یک خط باعث کاهش P_{ij} و انتقال بخشی از توان به مسیرهای موازی می‌شود که در مجموع ظرفیت استفاده از شبکه را بالا می‌برد.

شکل های ۳ و ۴ بازتوزیع توان پس از نصب ۲۹ دستگاه D-FACTS در خط K-L را نمایش می دهند.



شکل ۲. معیار امنیت N-1، خط بین باس A، B و C باز می شود.

جدول ۳. احتمالات N-1

تعداد کل سناریوها	بیشینه تعداد ادوات در هر خط	تعداد خطوط تحت تأثیر	تعداد ۷۵٪
۵۴	۱۷	۲۶	۷۵٪
۵۴	۷	۷	۸۵٪
۵۴	۱	۱	۹۰٪
۵۴	۱	۱	۹۵٪
۵۴	۱	۱	۱۰۰٪

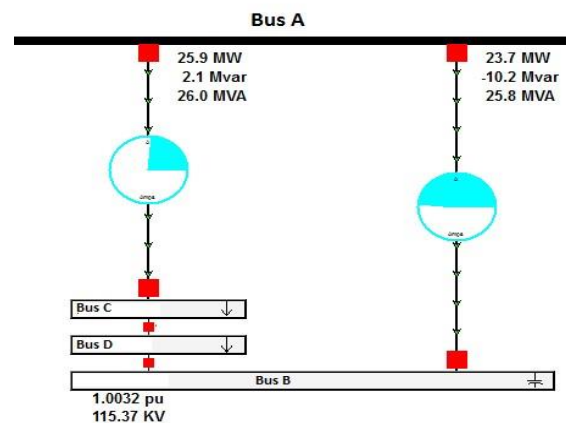
جدول ۴. معیار امنیت N-2

بیشینه تعداد ادوات در یک خط	تعداد خطوط تحت تأثیر	تعداد سناریوهای خرابی	تعداد ۴۷ میکرو هانری
۷۷	۱۵	۲۸	۴۷ میکرو هانری
۵۷	۱۲	۸۰	۵۳/۷ یا ۱۰۵/۷ میکرو هانری

روی خطوط بحرانی کاهش یافته است. همچنین، شکل ۱ نمای کلی باس های A و B را در وضعیت نرمال پیش از خرابی نشان می دهد؛ این تصاویر پایه ای برای تحلیل های بعدی هستند.

جدول ۲. ظرفیت خطوط پیش و پس از قرارگیری ادوات

ظرفیت انتقال در N-1 حالت بحرانی (Worst Case)	ظرفیت انتقال در حالت پایه (Nominal)	وضعیت سیستم
۱۴۶۹ MW	۱۹۰۴ MW	بدون D-FACTS
۲۳۳۹ MW	۲۵۴۲ MW	با D-FACTS



شکل ۱. وضعیت شین ها تحت معیار امنیت N-1

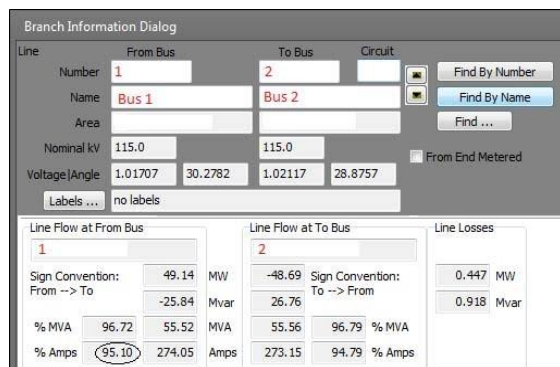
۲-۳ نتایج معیار امنیت N-1 شناسایی خطوط بحرانی

پنج تراز فعال سازی بین ۷۵ تا ۱۰۰ درصد بارگذاری خطوط مقایسه شد. همان گونه که در جدول ۳ آمده است، تعداد خطوط بحرانی از ۲۶ خط در تراز ۷۵٪ به تنها ۱ خط در تراز ۹۵٪ کاهش یافت. شکل ۲ موقعیت خرابی خط A-C و مسیر جدید شارش نیرو را نشان می دهد خط بازی از باس A تا C را به رنگ سبز و خط باس A تا B را رنگ نارنجی نشان می دهد که به معنای بارگذاری اضافه می باشد.

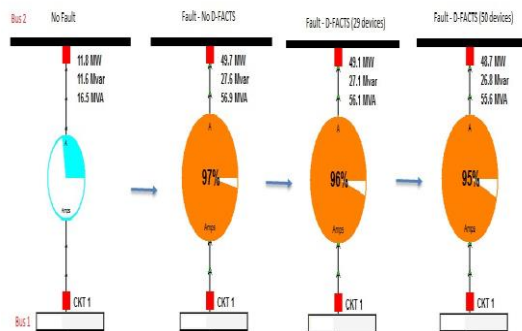
۳-۳ نتایج تحلیل معیار امنیت N-2 و مقایسه مدل های D-FACTS

هم زمان دو خط ۲۳۰ کیلوولت دچار خرابی می شوند، جدول ۴ مقادیر خطوط درگیر و تعداد ادوات لازم را برای دو ضریب القایی ۴۷ و ۱۰۵،۷ میکرو هانری مقایسه می کند؛ داده ها نشان می دهند افزایش ضریب القایی موجب کاهش تعداد خطوط بحرانی می شود.

شکل ۵ چیدمان خط از باس ۱ تا ۲ با ۵۰ ماژول فعال D-FACTS را نمایش می‌دهد که بارگذاری را به ۹۵٪ کاهش داده است. الگوی رفتاری این بهبود مرحله به مرحله در شکل ۶ دیده می‌شود که تکامل تغییرات خط را طی فرایند تعدیل نشان می‌دهد در ارزیابی فنی-اقتصادی، مشاهده شد مدل‌های تجاری Smart Wires با ضریب القایی بالا (تا ۱۰۵/۷ میکروهنری) دارای هزینه نصب کمتر و بازده انرژی بیشتر هستند. مطابق شکل‌های ۵ و ۶، کاهش تلفات شبکه و کوتاه شدن دوره بازگشت سرمایه به روشنی دیده می‌شود. بر اساس محاسبات مالی، بهره‌گیری از D-FACTS در خطوطی با بار بحرانی متوسط علاوه بر حفظ پایداری، توجیه اقتصادی مناسبی نیز دارد. در پایان، خلاصه عددی نتایج در جدول ۶ آمده است که نشانگر افزایش توان انتقال، کاهش رخدادهای بحرانی و بهبود شاخص‌های بهره‌برداری شبکه است.



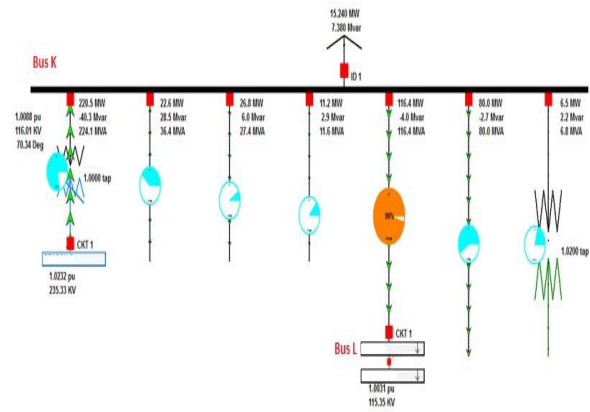
شکل ۵. نمای خط از باس ۱ تا باس ۲ همراه با ۵۰ D-FACTS



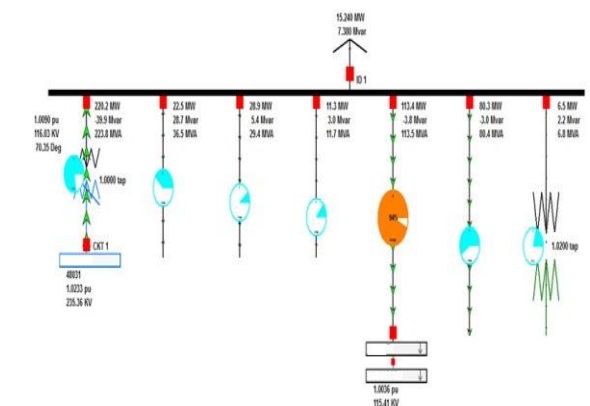
شکل ۶. تکامل خرابی خط

جدول ۶. خلاصه عددی نتایج

شاخص عملکرد	D-FACTS بدون	D-FACTS با	تغییر (%)
ظرفیت انتقال	۱۹۰۴ MW	۲۵۴۲ MW	+۳۳,۵
حالت بحرانی	۱۴۶۹ MW	۲۳۳۹ MW	+۵۹,۳
رخدادهای N-1	۲۶	۱	-۹۶
بار خط K-L	۹۶٪	۹۱٪	-۵



شکل ۳. توزیع مجدد توان در شبکه WECC پس از وقوع خرابی N-2



شکل ۴. بهبود توزیع توان پس از نصب ۲۹ دستگاه D-FACTS در خط K-L

۳-۴- حالت سیستم همسایه

خرابی باس EXT یا مبدل ۲۳۰/۱۱۵ کیلوولت تأثیر مستقیم بر خطوط مجاور دارد. داده‌های جدول ۵ میزان تغییر جریان و ادوات موردنیاز برای نگهداری شرایط پایدار را مشخص می‌کند.

جدول ۵. همسایه احتمال N-1. بدترین احتمال ممکن

مقدار تغییر	مقدار مرجع	مقدار	المان	سناریوی خرابی
۲۹	۰	۲۹	خط بین شین ۱ و شین ۲	شین EXT با ولتاژ ۱۱/۲۳۰ کیلوولت (مجاور)
۲۹	۰	۲۹	خط بین شین ۱ و شین ۲	شین EXT با ولتاژ ۱۱۵ کیلوولت (مجاور)

۲-	۹۵٪	۹۷٪	بار خط ۲-۱
----	-----	-----	------------

به طور کلی می توان نتیجه گرفت که استفاده از ادوات D-FACTS سبب ارتقای بهره برداری شبکه تا حدود ۳۳/۵ درصد، کاهش رخدادهای بحرانی N-1 از ۲۶ مورد به ۱ مورد، و پایداری جریان های خطوط در محدوده امن (زیر ۹۵ درصد ظرفیت) گردید.

نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر به کارگیری ادوات انعطاف پذیر توزیع شده کنترل جریان توان بر عملکرد شبکه انتقال قدرت مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، افزایش ظرفیت انتقال و بهبود قابلیت اطمینان شبکه از طریق بهره برداری مؤثرتر از زیرساخت های موجود، بدون نیاز به توسعه فیزیکی خطوط انتقال، بود. نتایج حاصل از شبیه سازی ها نشان داد که استفاده از این ادوات منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت انتقال شبکه، توزیع یکنواخت تر بار میان خطوط و کاهش تلفات توان می شود. این نتایج بیانگر آن است که این فناوری می تواند به عنوان راهکاری فنی-اقتصادی

مؤثر، جایگزین مناسبی برای توسعه های پرهزینه شبکه باشد. بررسی سناریوهای مختلف خرابی بر اساس معیارهای امنیت N-1 و N-2 نشان داد که به کارگیری این ادوات نقش مؤثری در کاهش تراکم خطوط بحرانی و حفظ پایداری شبکه ایفا می کند. در حالت خرابی تک خط، اعمال این تجهیزات موجب کنترل جریان های عبوری و حفظ آن ها در محدوده مجاز بهره برداری شد و از بروز شرایط ناپایدار جلوگیری کرد. همچنین، در سناریوهای شامل دو خرابی هم زمان، با انتخاب مناسب تعداد ادوات و تنظیم صحیح پارامترهای القایی، شبکه توانست پایداری خود را حفظ کرده و بارگذاری خطوط بحرانی را به سطح ایمن کاهش دهد.

نتایج به دست آمده نشان می دهند که این فناوری علاوه بر انعطاف پذیری بالا، برای شرایط پیچیده بهره برداری و سناریوهای بحرانی نیز کارایی قابل توجهی دارد. در جمع بندی نهایی می توان گفت که ادوات انعطاف پذیر توزیع شده کنترل جریان توان، ابزاری کارآمد برای بهره برداری هوشمند از شبکه های قدرت محسوب می شوند و قادرند ظرفیت انتقال شبکه را بیش از یک سوم افزایش دهند، در حالی که قابلیت اطمینان، ایمنی و کارایی کلی شبکه نیز به طور هم زمان بهبود می یابد.

مراجع

- [۱] B. Yuan, "Research progress and research prospects for configuration method of flexible AC transmission system device," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 410–422, 2021.
- [۲] H. Johal and D. Divan, "Design considerations for series-connected distributed FACTS converters," *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 43, no. 6, pp. 1609–1618, 2007.
- [۳] F. Kreikebaum, D. Das, J. Hernandez, and D. Divan, "Ubiquitous power flow control in meshed grids," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, ۲۰۰۹, IEEE, pp. 3907–3914.
- [۴] F. Kreikebaum, M. Imayavaramban, and D. Divan, "Active smart wires: An inverter-less static series compensator," in *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010: IEEE, pp. 3626–3630.
- [۵] V. Kakkar and N. Agarwal, "Recent trends on FACTS and D-FACTS," in *2010 Modern Electric Power Systems*, 2010: IEEE, pp. 1–8.
- [۶] K. M. Rogers and T. J. Overbye, "Power flow control with distributed flexible AC transmission system (D-FACTS) devices," in *41st North American power symposium*, 2009: IEEE, pp. 1–6.
- [۷] D. Divan, "Improving power line utilization and performance with D-FACTS devices," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, 2005: IEEE, pp. 2419–2424.
- [۸] H. Li, F. Li, P. Zhang, and X. Zhao, "Optimal utilization of transmission capacity to reduce congestion with distributed FACTS," in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 2009: IEEE, pp. 1–5.
- [۹] M. M. Islam et al., "Improving reliability and stability of the power systems: A comprehensive review on the role of energy storage systems to enhance flexibility," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 152738–152765, 2024.
- [۱۰] S. K. Gupta, S. K. Mallik, A. Ranjan, and M. Ranjan, "An overview of the operation and control of distributed power flow controller," *Electrical Engineering*, vol. 107, no. 12, pp. 15279–15304, 2025.
- [۱۱] L. Yang, X. Cui, and Y. Qin, "Emergency power supply scheme and fault repair strategy for distribution networks considering electric-traffic synergy," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 40, p. 101575, 2024.
- [۱۲] M. Lu, M. Qin, J. Kacatl, E. Suresh, T. Long, and S. M. Goetz, "A novel direct-injection universal power flow and quality control circuit," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 6, pp. 6028–6041, ۲۰۲۳.

- [۱۳] G. Ning, S. He, Y. Wang, L. Yao, and Z. Wang, "Design of distributed FACTS controller and considerations for transient characteristics," in *2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006, vol. 3: IEEE, pp. 1–5 .
- [۱۴] D. Divan and H. Johal, "Distributed FACTS-A new concept for realizing grid power flow control," in *2005 IEEE 36th power electronics specialists conference*, 2005: IEEE, pp. 8–14 .
- [۱۵] D. Das, A. Prasai, R. G. Harley, and D. Divan, "Optimal placement of distributed FACTS devices in power networks using particle swarm optimization," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009: IEEE, pp. 527–534 .
- [۱۶] F. Kreikebaum, D. Das, Y. Yang, F. Lambert, and D. Divan, "Smart Wires—A distributed, low-cost solution for controlling power flows and monitoring transmission lines," in *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, 2010: IEEE, pp. 1–8 .
- [۱۷] K. Ma, M. Liserre, F. Blaabjerg, and T. Kerekes" ,Thermal loading and lifetime estimation for power device considering mission profiles in wind power converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 590–602, 2014.
- [۱۸] A. C. Corredor, "D-FACTS for Improved Reliability of," University of Idaho, 2016 .
- [۱۹] H. Johal, *Distributed Series Reactance: A new approach to realize grid power flow control*. Georgia Institute of Technology, 2008.
- [۲۰] J. Liang, D. D. Molina, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, "Two-level dynamic stochastic optimal power flow control for power systems with intermittent renewable generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2670–2678, 2013.

Optimal Analysis and Simulation of Distributed FACTS Devices in Power Transmission Lines with an Emphasis on Improving Power System Stability and Efficiency

Tayebe Ghelichpour, Mahdiyeh Eslami

چکیده

The increasing need for electrical power and the inability to extend the transmission infrastructure have led to a focus on cost-effective approaches that can enhance the transmission system's capacity and stability. The Distributed Flexible AC Transmission System devices offer a viable solution for power flow control, which can directly be installed on the transmission lines with minimum substation modifications. In this article, the technical and economical feasibility of effective use of the D-FACTS devices, simulated by the Power World Simulator, with practical data on the WECC transmission power system, has been explored. The performance of the power system has been analyzed under the basic case, N-1, and N-2 contingencies. The simulation has confirmed that the use of the D-FACTS technique results in a critical line load below the secure limit and raises the Available Transfer Capability by 33.5% on the IEEE 39 bus test system. Furthermore, economical feasibility has confirmed that the use of the D-FACTS devices offers a reduced expenditure in comparison to the new line installation, thus minimizing the power losses. The efficacy of the D-FACTS technique has thus been demonstrated to provide an economical solution to enhance transmission power reliability and efficiency.
