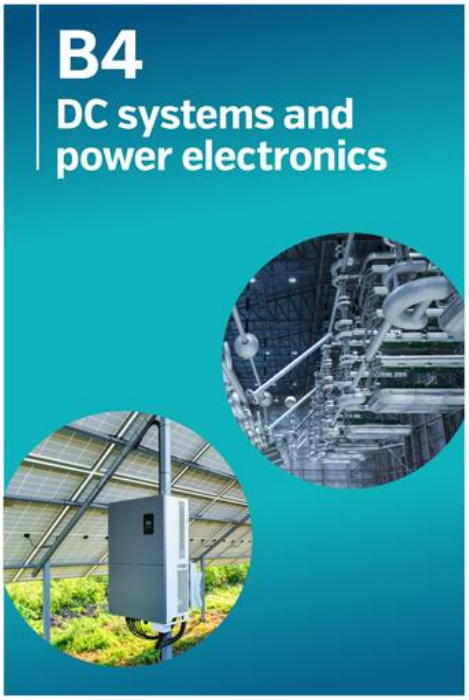
بروشور فنی TB ۹۳۴ مجله الکترا ۳۳۵

کمیته مطالعاتی سیستم‌های DC و الکترونیک قدرت

مروری بر اثرات متقابل مبدل‌های الکترونیک قدرت در شبکه‌های مدرن





cigre
Iran



گزارش شماره ۹

چکیده

رشد روزافزون استفاده از سامانه‌های انتقال HVDC، تجهیزات FACTS، نیروگاه‌های بادی و خورشیدی و سایر تجهیزات مبتنی بر الکترونیک قدرت، ساختار سنتی شبکه‌های قدرت را به‌طور اساسی تغییر داده است. هرچند این فناوری‌ها موجب افزایش قابلیت کنترل و انعطاف‌پذیری شبکه شده‌اند، اما همزمان پدیده‌های جدیدی را نیز ایجاد کرده‌اند که در شبکه‌های سنتی کمتر مشاهده می‌شدند. یکی از مهم‌ترین این پدیده‌ها، اثرات متقابل[1] میان تجهیزات الکترونیک قدرت و شبکه است. این اثرات می‌توانند به شکل نوسانات فرکانسی، تشدید هارمونیکی، کاهش میرایی سیستم و حتی ناپایداری گسترده ظاهر شوند. بروشور فنی TB 934 منتشر شده توسط کمیته سامانه‌های DC و الکترونیک قدرت CIGRE به بررسی جامع این موضوع پرداخته و روش‌های شناسایی، تحلیل و کاهش این پدیده‌ها را ارائه کرده است. در این مقاله مروری، مهم‌ترین یافته‌ها و توصیه‌های این کتابچه مرور می‌شود.

۱- مقدمه

در گذشته، بخش عمده تولید و انتقال انرژی الکتریکی توسط ماشین‌های سنکرون انجام می‌شد. رفتار دینامیکی این ماشین‌ها طی دهه‌ها مطالعه شده بود و روش‌های استانداردی برای تحلیل پایداری آنها وجود داشت. اما در سال‌های اخیر سهم تجهیزات الکترونیک قدرت در شبکه‌های انتقال و توزیع به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. اتصال مزارع بادی فراساحلی، توسعه خطوط جریان مستقیم ولتاژ بالا[2] (HVDC)، استفاده از جبران‌سازهای استاتیکی و گسترش منابع تولید پراکنده باعث شده که رفتار شبکه بیش از گذشته تحت تأثیر الگوریتم‌های کنترلی قرار گیرد. در چنین شرایطی، پایداری سیستم تنها تابع ویژگی‌های فیزیکی تجهیزات نیست، بلکه عملکرد کنترلرها و نحوه تعامل آنها با شبکه نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. تجربه برخی پروژه‌های بزرگ HVDC در اروپا، آسیا و آمریکای شمالی نشان داده که حتی در صورت عملکرد صحیح تک‌تک تجهیزات، امکان بروز ناپایداری ناشی از تعامل میان آنها وجود دارد. همین موضوع انگیزه اصلی تدوین بروشور ۹۳۴ است.

۲- مفهوم و نمونه‌های اثرات متقابل در شبکه‌های مبتنی بر مبدل

اثر متقابل زمانی رخ می‌دهد که پاسخ دینامیکی یک تجهیز بر عملکرد تجهیز دیگری اثر گذاشته و این اثر به‌صورت بازخوردی به تجهیز اول بازگردد. در شبکه‌های سنتی این تعامل عمدتاً میان ماشین‌های سنکرون و شبکه انتقال رخ می‌داد، اما در شبکه‌های جدید دامنه این تعاملات بسیار گسترده‌تر شده است.

به‌عنوان‌مثال ممکن است یک مبدل منبع ولتاژ[3] (VSC) برای استفاده در یک سیستم HVDC با استفاده از حلقه کنترل توان راکتیو سعی در تثبیت ولتاژ شبکه داشته باشد، درحالی‌که یک جبران‌کننده سنکرون استاتیکی[4] (STATCOM)

[1]. Interaction
[2]. High Voltage Direct Current
[3]. Voltage Source Converter
[4]. Static Synchronous Compensator

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

مجاور نیز هدف مشابهی را دنبال کند. اگر تنظیمات این دو کنترلر هماهنگ نباشد، احتمال شکل‌گیری نوسانات کم‌میرایی وجود خواهد داشت. این نوسانات ممکن است در ابتدا بسیار کوچک باشند اما به تدریج رشد کرده و عملکرد کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهند.

نکته مهم آن است که بسیاری از این مشکلات در مطالعات اولیه قابل مشاهده نیستند و تنها پس از بهره‌برداری یا در شرایط خاص شبکه آشکار می‌شوند. نمونه متداول برای این مسئله، وقوع رخدادهای واقعی در پروژه‌های بزرگ HVDC و انرژی‌های تجدیدپذیر است. در بسیاری از این پروژه‌ها، تجهیزات نصب‌شده به‌صورت مستقل تمامی آزمون‌های عملکردی را با موفقیت پشت سر گذاشته بودند، اما پس از اتصال به شبکه، نوسانات پیش‌بینی‌نشده‌ای ظاهر شد که منشأ آنها تعامل میان تجهیزات مختلف بود.

یکی دیگر از شناخته‌شده‌ترین نمونه‌ها، مربوط به برخی مزارع بادی مجهز به ژنراتورهای القایی با تغذیه دوگانه[5] (DFIG) است که از طریق خطوط انتقال طولانی به شبکه متصل شده بودند. در این پروژه‌ها مشاهده شد که سیستم در فرکانس‌هایی پایین‌تر از فرکانس نامی شبکه دچار نوسان می‌شود. بررسی‌های بعدی نشان داد که حلقه‌های کنترلی مبدل‌های الکترونیک قدرت با مودهای طبیعی شبکه وارد تعامل شده‌اند و پدیده اثر متقابل کنترلی زیرسنکرون[6] (SSCI) رخ داده است.

اهمیت این حادثه در آن بود که برخلاف پدیده تشدید زیرسنکرون[7] (SSR) کلاسیک که عمدتاً به تعامل تجهیزات مکانیکی و الکتریکی مربوط می‌شد، در اینجا منشأ اصلی ناپایداری کنترلرهای الکترونیکی بودند. این موضوع دیدگاه مهندسان نسبت به تحلیل پایداری را به طور اساسی تغییر داد.

در برخی پروژه‌های HVDC جدید نیز، چندین ایستگاه VSC به یک شبکه مشترک متصل شده‌اند. مطالعات بهره‌برداری نشان داد که در شرایط خاص، حلقه‌های کنترل ولتاژ و توان این مبدل‌ها می‌توانند بر یکدیگر اثر گذاشته و موجب کاهش میرایی سیستم شوند. در این موارد، هر مبدل به تنهایی کاملاً پایدار بود اما اتصال همزمان چند مبدل به شبکه موجب شکل‌گیری مودهای نوسانی جدید شد. این تجربه اهمیت مطالعات چندورودی[8] و شاخص‌های ضریب اثر متقابل چندورودی[9] (MIIF) را برجسته ساخت.

در تعدادی از شبکه‌های انتقال که از تجهیزات FACTS نظیر SVC و STATCOM استفاده می‌کردند، افزایش غیرمنتظره اعوجاج هارمونیکی مشاهده شد. بررسی‌ها نشان داد که فرکانس‌های طبیعی شبکه با مشخصات فیلترها و کنترلرهای تجهیزات الکترونیک قدرت هم‌پوشانی پیدا کرده‌اند. این پدیده موجب افزایش تنش حرارتی تجهیزات و کاهش عمر برخی اجزای شبکه شد. رفع مشکل مستلزم بازطراحی فیلترها و بازتنظیم پارامترهای کنترلی بود.

یکی از رایج‌ترین مشکلات گزارش‌شده در سال‌های اخیر به عملکرد PLL مربوط است. در شبکه‌هایی که سطح اتصال کوتاه پایین است، تغییرات ولتاژ می‌تواند باعث عملکرد نامناسب PLL شود. این مسئله به نوبه خود موجب تغییر زاویه مرجع کنترلر و ایجاد نوسانات کم‌میرایی می‌شود. به همین دلیل، امروزه طراحی PLL به یکی از موضوعات اصلی تحقیقات

[5]. Doubly-Fed Induction Generator
[6]. Sub-synchronous control interactions
[7]. Sub-Synchronous Resonance
[8]. Multi-Infeed
[9]. Multi-Infeed Interaction Factor

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

در حوزه مبدل‌های قدرت تبدیل شده است و بسیاری از سازندگان از ساختارهای پیشرفته‌تر برای افزایش پایداری در شبکه‌های ضعیف استفاده می‌کنند.

۳- طبقه‌بندی اثرات متقابل

براساس تحلیل‌های موردی مانند مسائل مذکور در بخش قبل و جمع‌بندی آن‌ها، گزارش TB 934 اثرات متقابل را به چند گروه اصلی تقسیم می‌کند که عبارتند از:

۱- **تعاملات ناشی از حلقه‌های کنترلی:** امروزه مبدل‌های قدرت دارای حلقه‌های کنترل متعددی شامل کنترل جریان، کنترل ولتاژ، کنترل توان اکتیو و راکتیو، حلقه قفل فاز[۱۰] (PLL) و سیستم‌های میرایی هستند. هر یک از این حلقه‌ها دارای پهنای باند و مشخصات دینامیکی خاص خود هستند و در صورت هم‌پوشانی فرکانسی ممکن است موجب ایجاد ناپایداری شوند.

۲- **تعاملات تشدیدی**[۱۱]: در این حالت، فرکانس طبیعی شبکه با فرکانس عملکرد یکی از تجهیزات یا کنترلرها نزدیک شده و در نتیجه پدیده تشدید رخ می‌دهد. پیامد نهایی برای این وضعیت می‌تواند افزایش شدید جریان یا ولتاژ در بخشی از شبکه برق باشد.

۳- **ایجاد پدیده‌های زیرسنکرون:** این پدیده‌ها معمولاً در فرکانس‌هایی پایین‌تر از فرکانس نامی شبکه رخ می‌دهند و می‌توانند با مودهای مکانیکی توربین ـ ژنراتور برهم‌کنش داشته باشند. تجربه نشان داده است که برخی از این نوسانات قادرند تنش‌های مکانیکی قابل توجهی به محور ژنراتورها وارد کنند.

۴- نقش شبکه‌های ضعیف در بروز ناپایداری

یکی از مهم‌ترین نتایج گزارش TB 934 تأکید بر نقش شبکه‌های ضعیف در بروز تعاملات نامطلوب است. در یک شبکه ضعیف، تغییرات توان یا جریان تزریق‌شده توسط مبدل‌ها می‌تواند تغییرات ولتاژ قابل توجهی ایجاد کند. این تغییرات ولتاژ، مجدداً بر عملکرد حلقه‌های کنترلی مبدل اثر گذاشته و احتمال شکل‌گیری نوسانات را افزایش می‌دهد.

شاخص متداول برای ارزیابی قدرت شبکه، نسبت اتصال کوتاه[۱۲] (SCR) است. هرچه مقدار SCR کمتر باشد، شبکه ضعیف‌تر تلقی می‌شود. در چنین شرایطی، عملکرد PLL حساس‌تر شده و حاشیه پایداری کاهش می‌یابد. به همین دلیل، بسیاری از پروژه‌های جدید HVDC نیازمند مطالعات پایداری دقیق در شرایط حداقل SCR هستند.

۵- روش‌های تحلیل اثرات متقابل

برای تحلیل این پدیده‌ها نمی‌توان به یک ابزار واحد اکتفا کرد. هر روش، بخشی از رفتار سیستم را آشکار می‌سازد و معمولاً ترکیبی از چند روش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[10]. Phase Locked Loop
[11]. Resonant Interactions
[12]. Short Circuit Ratio

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

مطالعات مقدار مؤثر یا همان ریشه متوسط مجذور[۱۳] (RMS) نخستین سطح تحلیل را تشکیل می‌دهند. این مطالعات برای بررسی پایداری زاویه‌ای، فرکانسی و ولتاژی مناسب هستند و به دلیل سرعت بالای محاسباتی در مراحل اولیه طراحی کاربرد فراوان دارند. با این حال، بسیاری از جزئیات رفتار مبدل‌ها در این مدل‌ها حذف می‌شود.

در مقابل، مطالعات گذرای الکترومغناطیسی[۱۴] (EMT) قادرند عملکرد واقعی نیمه‌هادی‌ها، هارمونیک‌ها و کنترلرها را با دقت بالا مدل‌سازی کنند. به همین دلیل، این روش به عنوان مرجع نهایی برای ارزیابی تعامل مبدل‌ها شناخته می‌شود. تقریباً تمامی پروژه‌های بزرگ HVDC در مرحله نهایی، توسط مطالعات EMT اعتبارسنجی می‌شوند.

علاوه بر این، تحلیل سیگنال کوچک[۱۵] ابزار ارزشمندی برای شناسایی مودهای ناپایدار است. در این روش، سیستم حول نقطه کار خطی‌سازی شده و قطب‌ها و مقادیر ویژه استخراج می‌شوند. با استفاده از این اطلاعات، می‌توان منشأ نوسانات را شناسایی و سهم هر تجهیز در ایجاد آنها را تعیین کرد.

یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای تحلیل پایداری در سال‌های اخیر، به‌عنوان رویکردی نوین برای مطالعه پایداری، استفاده از تحلیل امپدانسی است. در این رویکرد، شبکه و مبدل به‌صورت دو امپدانس وابسته به فرکانس مدل می‌شوند و شرایط پایداری از طریق بررسی نسبت این امپدانس‌ها تعیین می‌گردد.

اهمیت این روش در آن است که حتی بدون دسترسی به جزئیات کامل کنترلرها نیز می‌توان رفتار سیستم را ارزیابی کرد. این ویژگی برای اپراتورهای شبکه بسیار ارزشمند است؛ زیرا بسیاری از سازندگان تجهیزات، اطلاعات داخلی کنترلرهای خود را محرمانه نگه می‌دارند. امروزه تحلیل امپدانسی، به یکی از روش‌های استاندارد ارزیابی پایداری در پروژه‌های مبتنی بر مبدل تبدیل شده است.

جدول ۱: مقایسه بین روش‌های مختلف تحلیل اثر متقابل بین تجهیزات الکترونیک قدرت و شبکه

روش تحلیل	مزیت	محدودیت	کارکرد اصلی
RMS	سرعت بالا	عدم نمایش رفتار سریع مبدل و حذف برخی از اطلاعات	تحلیل رفتار کلی سیستم و پایداری الکترومکانیکی
EMT	دقت بالا	زمان محاسباتی بالا	شناسایی مودهای نوسانی و پایداری کنترلی
سیگنال کوچک	شناسایی مودها	نیاز به استخراج مدل خطی‌شده	بررسی اثرمتقابل تجهیزات مبتنی بر الکترونیک قدرت
امپدانسی	مناسب برای تحلیل اثرات متقابل بین تجهیزات و شبکه	نیاز به داده‌ها در حوزه فرکانس	تأیید نهایی تحلیل، تشدیدها، هارمونیک‌ها، SSR، و رفتار سریع مبدل‌ها

13. Root Mean Square
14. Electromagnetic Transient
15. Small Signal Analysis

در مجموع می‌توان مطابق با جدول ۱، مقایسه‌ای کلی را بین روش‌های تحلیل ارائه کرد. با توجه به کارکردهای هرکدام که در جدول ۱ نیز ارائه‌شده است، برای تحقق یک تحلیل پایداری کامل در شبکه، باید ابتدا تحلیل RMS، سپس سیگنال کوچک، بعدازآن تحلیل امپدانسی، و در نهایت بررسی EMT به‌صورت ترتیبی انجام شوند.

۶- مدیریت ریسک در طول چرخه عمر پروژه

یکی از پیام‌های کلیدی در گزارش TB 934 این است که بررسی اثرات متقابل نباید به مرحله بهره‌برداری محدود شود. در واقع، ارزیابی این پدیده‌ها باید از نخستین مراحل طراحی آغاز گردد.

در مرحله امکان‌سنجی، مطالعات غربالگری برای شناسایی نقاط پرخطر انجام می‌شود. سپس در مراحل طراحی تفصیلی، مدل‌سازی دقیق‌تر و مطالعات RMS و EMT صورت می‌گیرد. پس از نصب تجهیزات نیز آزمون‌های بلادرنگ و پایش مداوم عملکرد سیستم توصیه می‌شود.

این رویکرد چرخه عمر در نهایت باعث می‌شود که مشکلات بالقوه، پیش از تبدیل شدن به یک مسئله عملیاتی، شناسایی و برطرف شوند.

۷- راهکارهای کاهش اثرات متقابل

گزارش TB 934 مجموعه‌ای از راهکارهای عملی برای کاهش ریسک تعاملات ارائه می‌دهد. یکی از مهم‌ترین راهکارها، بازتنظیم حلقه‌های کنترلی و کاهش هم‌پوشانی پهنای باند کنترلرها است. در بسیاری از موارد، تنها با اصلاح ضرایب مربوط به کنترلر PI می‌توان حاشیه پایداری را به‌طور محسوسی افزایش داد.

راه‌کار دیگر، استفاده از فیلترهای مناسب برای حذف مودهای تشدیدی است. همچنین در برخی پروژه‌ها، نصب تجهیزات FACTSیا افزایش SCR شبکه توانسته است مشکلات پایداری را برطرف کند.

در کنار این موارد، هماهنگی مناسب میان سازندگان تجهیزات و اپراتورهای شبکه اهمیت ویژه‌ای دارد. بدون تبادل اطلاعات فنی کافی، انجام مطالعات معتبر و دستیابی به نتایج قابل اعتماد دشوار خواهد بود.

۸- جمع‌بندی

گسترش فناوری‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت موجب شده است که مفهوم پایداری در سیستم‌های قدرت وارد مرحله جدیدی شود. در چنین شبکه‌هایی، رفتار دینامیکی تنها به تجهیزات فیزیکی وابسته نیست، بلکه تعامل میان کنترلرها و شبکه نیز نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. در واقع، بررسی تجربیات عملی نشان می‌دهد که بخش عمده مشکلات اثرهای متقابل، ناشی از نقص تجهیزات نیست؛ بلکه از تعامل پیش‌بینی‌نشده میان تجهیزات مختلف ناشی می‌شود. این موضوع تأکید می‌کند که انجام آزمون‌های مستقل برای هر تجهیز کافی نیست و رفتار کل سامانه باید به صورت یکپارچه مورد ارزیابی قرار گیرد.

گزارش TB 934 از کمیته سامانه‌های DC و الکترونیک قدرت SIGRE نشان می‌دهد که تحلیل دقیق این تعاملات، نیازمند استفاده همزمان از روش‌های مختلفی نظیر تحلیل سیگنال کوچک، مطالعات EMT و تحلیل امپدانسی بوده و باید به

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

عنوان بخش جدایی‌ناپذیر فرآیند طراحی و بهره‌برداری در نظر گرفته شده و نیز تأکید می‌کند که مدیریت ریسک باید در تمام مراحل چرخه عمر پروژه دنبال شود.

با توجه به روند رو به رشد استفاده از HVDC، ادوات FACTS و منابع تجدیدپذیر، انتظار می‌رود موضوع اثرات متقابل در سال‌های آینده به یکی از مهم‌ترین حوزه‌های پژوهش و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت تبدیل شود. آشنایی مهندسان و پژوهشگران با این مفاهیم برای طراحی و بهره‌برداری مطمئن از شبکه‌های آینده ضروری خواهد بود.

کمیته مطالعاتی سیستمهای DC و الکترونیک قدرت B4

سیگره ایران

شهریور ماه ۱۴۰۵

مرجع اصلی: CIGRE Electra No. 335 – دسترسی به مراجع از طریق سایت https://www.e-cigre.org

تهیه کنندگان:

آقای دکتر علیرضا خوش سعادت از شرکت مهندسی و ساخت برق و کنترل مپنا (مکو) و عضو هیأت علمی دانشگاه شهید بهشتی ـ رییس کمیته مطالعاتی B4

آقای مهندس احمدرضا علوی کوشا از شرکت مونتکو ایران ـ دبیر کمیته مطالعاتی B4

برای کسب اطلاعات تکمیلی با دبیرخانه سیگره ایران تماس بگیرید.

این گزارش شامل خلاصه‌ای برای معرفی یکی از بروشورهای فنی منتشر شده توسط سیگره بین الملل و منبع معرفی آن، مجله الکترا می باشد.

Electra, reprinted/translated with permission from CIGRE, © 2026

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

کمیته های مطالعاتی متناظر سیگره ایران	کمیته های مطالعاتی سیگره بین الملل
Group A – Equipment	
ماشین‌های الکتریکی دوار و تولید برق	**A1** Power Generation and Electromechanical Energy Conversion
ترانسفورماتورها و راکتورها	**A2** Power transformers and reactors
تجهیزات انتقال و توزیع	**A3** Transmission and distribution equipment
Group B – Technologies	
کابل‌های عایق شده	**B1** Insulated cables
خطوط انتقال هوایی برق	**B2** Overhead lines
پست‌های فشار قوی	**B3** Substations and electrical installations
سیستم‌های DC و الکترونیک قدرت	**B4** DC systems and power electronics
حفاظت و اتوماسیون	**B5** Protection and automation
Group C – Systems	
توسعه سیستم قدرت و جنبه های اقتصادی	**C1** Power system development and economics
سیستم بهره برداری و کنترل	**C2** Power system operation and control
پایداری و عملکرد زیست محیطی سیستمهای قدرت	**C3** Power System Sustainability and Environmental Performance
عملکرد فنی سیستمهای قدرت	**C4** Power system technical performance
بازار برق و تنظیم گری	**C5** Electricity markets and regulation
شبکه‌های توزیع فعال و منابع انرژی توزیع شده	**C6** Active distribution systems and distributed energy resources
Group D – New Materials and IT	
مواد و روشهای نوین آزمون	**D1** Materials and emerging test techniques
مخابرات و فناوری اطلاعات	**D2** Information Systems Telecommunications and Cybersecurity

cigre Iran

با ما در ارتباط باشید:

دبیرخانه سیگره ایران:

تهران - خیابان ولیعصر- بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار- پلاک ۱۲ - شرکت مونتکو ایران

شماره تماس: ۰۲۱-۸۱۹۶۷۰۱۶ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

مونتکو ایران
Monenco Iran