آنوراگ کی. سریواستاوا
ونکاتش ونکاتارامانان
کارل هاوزر

زیرساخت سایبری

برای شبکه هوشمند برق

دکتر مؤید محسنی
دکتر زهرا اسدی

ترجمک
Tarjomac
انتشارات ترجمک

زیرساخت سایبری برای شبکه هوشمند برق

امنیت سایبری

توجه :

کتاب حاضر حاصل زحمات **دکتر مؤید محسنی و دکتر زهرا اسدی زیدآبادی** می‌باشد. فایل کتاب حاوی اطلاعات **DRM** (مدیریت حقوق دیجیتال) است. وقتی برای اولین بار فایل را باز می کنید، کد شناسایی کتاب به همراه آدرس **IP** سیستم شما ذخیره شده و زمانیکه آنلاین شوید، به سرور انتشارات ترجمک انتقال می یابد.

خواهشمند است به حقوق نگارنده و انتشارات ترجمک احترام گذاشته و از توزیع بدون مجوز فایل کتاب اجتناب نمایید. شما با خرید و دانلود این کتاب موافقت نموده اید که اطلاعات فایل **DRM** به سرور انتشارات ترجمک انتقال یابد و در صورت محرز شدن نقض حقوق صاحب اثر، کلیه خسارات حاصله در طی فرآیند حقوقی و مطابق قانون حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان و ناشران جمهوری اسلامی (مصوب دوازده اسفند ۱۳۶۵ یا بعد از آن) از شما دریافت شود.

از اینکه با عرضه مقرون به صرفه کتاب های الکترونیک و شکوفایی انتشارات ترجمک همیاری می کنید، سپاسگزاریم.

انتشارات ترجمک

https://tarjomac.ir/shop/

آنوراگ کی. سریواستاوا

ونکاتش ونکاتارامانان

کارل هاوزر

زیرساخت سایبری
برای شبکه هوشمند برق

ترجمه

دکتر مؤید محسنی

دکتر زهرا اسدی زیدآبادی

ویراست اول

بهار ۱۴۰۴

انتشارات ترجمک

شماره کتابشناسی ملی	:	۱۰۰۸۱۱۵۷
سرشناسنامه	:	سریواستاوا، آنوراگ کومار (Srivastava, Anurag K.(Anurag Kumar
شابک	:	۹-۹۹-۷۸۵۵-۶۲۲-۹۷۸، ۳۵۰۰۰۰۰ ریال
عنوان و نام پدیدآور	:	زیرساخت سایبری برای شبکه هوشمند برق/ آنوراگ کی.سریواستاوا، ونکاتش ونکاتارامانان، کارل هاوزر؛ ترجمه موید حسینی، زهرا اسدی‌زیدآبادی
مشخصات نشر	:	همدان، ترجمک، ۱۴۰۴
مشخصات ظاهری	:	۱۹۸ص
شناسه افزوده	:	ونکاتارامانان، ونکاتش ((V. Venkatesh(Research engineer
شناسه افزوده		محسنی، موید، ۱۳۵۶–، مترجم
شناسه افزوده	:	اسدی زیدآبادی، زهرا، ۱۳۶۳–، مترجم
رده بندی کنگره	:	QA76/9
رده بندی دیویی	:	۰۰۴

شناسنامه کتاب

نام کتاب: زیرساخت سایبری برای شبکه هوشمند برق

ترجمه: دکتر موید محسنی، دکتر زهرا اسدی زیدآبادی

ناشر: انتشارات ترجمک

صفحه آرایی: انتشارات ترجمک

طراحی جلد: محمدحسین گیوی

نوبت چاپ: اول، ۱۴۰۴

قیمت (چاپی): ۳۵۰۰۰۰ تومان

قیمت (ایبوک): ۱۴۵۰۰۰ تومان

چاپ: گروه نشر الکترونیک ترجمک

شابک (پرینت): ۹۷۸-۶۲۲-۷۸۵۵-۹۹-۹

شابک (ایبوک): ۹۷۸-۶۲۲-۵۱۲۶-۰۰-۸

تلفن تماس: ۰۹۱۸۱۵۰۶۱۰۰

تارنمای اینترنتی: https://tarjomac.com

ISBN : 978-622-7855-99-9

ISBN : 978-622-5126-00-8

عنوان (فارسی): زیرساخت سایبری برای شبکه هوشمند برق

عنوان (انگلیسی): Cyber Infrastructure for the Smart Electric Grid

نویسنده:

آنوراگ کی. سریواستاوا

(**Anurag K. Srivastava**)

ونکاتش ونکاتارامانان

(**Venkatesh Venkataramanan**)

کارل هاوزر

(Carl Hauser)

مترجم:

دکتر موید محسنی

Moaied Mohseni, phd

دکتر زهرا اسدی زیدآبادی

Asadi-Zeidabadi Zahra, phd

شابک اورجینال:

ISBN: 978-1-119-46075-6 (hbk)

ISBN: 978-1-119-46075-6 (pbk)
ISBN: 978-1-119-46079-4 (ebk)

شابک ترجمه فارسی:

شابک (پرینت): ۹-۹۹-۷۸۵۵-۶۲۲-۹۷۸

شابک (ایبوک): ۸-۰۰-۷۸۵۵-۶۲۲-۹۷۸

سال انتشار: ۲۰۲۳ – جان وایلی و پسران (چاپ اول)

کلیه حقوق این اثر برای انتشارات ترجمک محفوظ است. این اثر شامل کلیه قوانین حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان و ناشران جمهوری اسلامی می باشند (مصوب دوازده اسفند ۱۳۶۵ یا بعد از آن)، و بهره برداری بدون مجوز از آن به هر شکلی ممنوع است.

انتشارات ترجمک: سال ۱۴۰۴

همدان، صندوق پستی ۱۱۷-۶۵۹۱۵ tarjomac@gmail.com

معرفی نویسندگان



آنوراگ کی. سریواستاوا (Anurag K. Srivastava)

دانشگاه ویرجینیای غربی، مورگان تاون، وست ویرجینیا، ایالات متحده آمریکا

دکتر آنوراگ کی. سریواستاوا استاد رایموند لین و رئیس بخش لین علوم کامپیوتر و مهندسی برق در دانشکده مهندسی و منابع معدنی بنجامین استاتلرStatler در دانشگاه ویرجینیای غربی می باشد. او مدیر آزمایشگاه انعطاف‌پذیری و تجزیه و تحلیل شبکه هوشمند (SGREAL) و عضو IEEE است.



ونکاتش ونکاتارامانان (Venkatesh Venkataramanan)

آزمایشگاه ملی انرژی های تجدیدپذیر، گلدن، کلرادو، ایالات متحده آمریکا

دکتر ونکاتش ونکاتارامانان، محقق آزمایشگاه ملی انرژی های تجدیدپذیر است که روی سیستم های فیزیکی–سایبری کار می کند. او قبلا در دانشگاه ایالتی واشنگتن و موسسه فناوری ماساچوست کار می کرد.



کارل هاوزر (Carl Hauser)

دانشگاه ایالتی واشنگتن، پولمن، واشنگتن، ایالات متحده آمریکا

کارل هاوزر، دکترا، استاد بازنشسته علوم کامپیوتر در دانشگاه ایالتی واشنگتن است. او دکترای خود را از دانشگاه کرنل دریافت کرد. پس از ۲۰ سال فعالیت در صنعت در تحقیقات IBM و تحقیقات زیراکس، او به WSU پیوست و در آنجا تحقیقاتی را در زمینه ارتباطات و امنیت سایبری برای عملیات شبکه برق انجام داد.

فهرست مندرجات در یک نگاه

عنوان صفحه

فصل ۱- مقدمه ای بر شبکه هوشمند ۱

فصل ۲- حس، ارتباط، محاسبه و کنترل به روشی ایمن ۱۹

فصل ۳- ساختار و استانداردهای عملیاتی شبکه هوشمند ۳۸

فصل ۴- عملکرد برقراری ارتباط و عوامل موثر بر آن ۴۷

فصل ۵- مدل برقراری ارتباط لایه ای ۶۰

فصل ۶- پروتکل های لایه اپلیکیشن سیستم قدرت ۸۶

فصل ۷- زیرساخت های IT کاربردی برای مرکز کنترل و رایانش تاب‌آور خطا ۱۰۲

فصل ۸- مفاهیم پایه امنیتی، پروتکل های رمزنگاری و کنترل دسترسی ۱۲۱

فصل ۹- حملات به و حفاظت از شبکه ۱۴۶

فصل ۱۰- آسیب پذیری ها و مدیریت ریسک ۱۶۴

فصل ۱۱- مطالعات موردی شبکه هوشمند ۱۸۶

فهرست مندرجات کتاب

عنوان صفحه

معرفی نویسندگان ..... ب
کلمات اختصاری ..... ح

فصل ۱- مقدمه ای بر شبکه هوشمند ۱
۱-۱ بازنگری شبکه برق قدرت ۱
۱-۲ چه چیزی در عملیات شبکه برق ممکن است اشتباه شود ۱۰
۱-۳ آموختن از وقایع گذشته ۱۲
۱-۴ به سوی شبکه الکتریکی هوشمندتر ۱۵
۱-۵ خلاصه فصل ۱۶
۱-۶ تمرینات چند گزینه ای ۱۶
۱-۷ سئوالات تشریحی ۱۷
منابع مطالعه بیشتر ۱۷

فصل ۲- حس، ارتباط، محاسبه و کنترل به روشی ایمن ۱۹
۲-۱ حسگری در شبکه هوشمند ۲۰
۲-۲ زیرساخت ارتباطی در شبکه هوشمند ۲۹
۲-۳ زیرساخت محاسباتی و الزامات کنترل در شبکه هوشمند ۳۰
۲-۴ امنیت سایبری در شبکه هوشمند ۳۴
۲-۵ خلاصه فصل ۳۵
۲-۶ سئوالات چند گزینه ای ۳۶
۲-۷ سئوالات تشریحی ۳۷
منابع مطالعه بیشتر ۳۷

فصل ۳- ساختار و استانداردهای عملیاتی شبکه هوشمند ۳۸
۳-۱ سازمان اطمینان از پایایی سیستم ۴۱
۳-۲ استانداردهای شبکه هوشمند و قابلیت اجرای داخلی ۴۳
۳-۳ ساختار عملیاتی در سایر نقاط جهان ۴۴

۳-۴ خلاصه فصل ۴۴
۳-۵ سئوالات چند گزینه ای ۴۵
۳-۶ سئوالات تشریحی ۴۶
منابع مطالعه بیشتر ۴۶

فصل ۴- عملکرد برقراری ارتباط و عوامل موثر بر آن ۴۷
۴-۱ مقدمه ۴۷
۴-۲ تاخیر انتشار (توزیع) ۴۹
۴-۳ تاخیر انتقال ۵۰
۴-۴ تاخیر و به هم ریختگی در صف ۵۱
۴-۵ تاخیر در پردازش ۵۴
۴-۶ تاخیر در شبکه های چند هاپ ۵۴
۴-۷ مفقودی و خرابی داده ها ۵۵
۴-۸ خلاصه ۵۶
۴-۹ تمرینات ۵۷
۴-۱۰ سئوالات تشریحی ۵۹
منابع مطالعه بیشتر ۵۹

فصل ۵- مدل برقراری ارتباط لایه ای ۶۰
۵-۱ مقدمه ۶۰
۵-۲ لایه فیزیکی ۶۴
۵-۳ لایه لینک: مدل های سرویس ۶۴
۵-۴ لایه شبکه: آدرس دهی و مسیریابی ۶۸
۵-۵ لایه انتقال: دیتاگرام و پروتکل های جریان ۷۴
۵-۶ لایه اپلیکیشن ۷۹
۵-۷ پروتکل های چسب: ARP و DNS ۸۱
۵-۸ مقایسه بین مدل‌های OSI و TCP/IP ۸۳
۵-۹ خلاصه فصل ۸۴
۵-۱۰ سئوالات چند گزینه ای ۸۴
۵-۱۱ سؤالات تشریحی ۸۵
منابع مطالعه بیشتر ۸۵

فصل ۶- پروتکل های لایه اپلیکیشن سیستم قدرت ۸۶
۶-۱ مقدمه ۸۶

۶-۲ پروتکل های اسکادا ۸۷
۶-۳ ICCP ۹۳
۶-۴ C37.118 ..... ۹۴
۶-۵ سنجش هوشمند و منابع انرژی توزیع شده ۹۶
۶-۶ همگام سازی زمان ۹۹
۶-۷ خلاصه فصل ۱۰۰
۶-۸ سئوالات چند گزینه ای ۱۰۰
۶-۹ سئوالات تشریحی ۱۰۱
منابع مطالعه بیشتر ۱۰۱

فصل ۷- زیرساخت های IT کاربردی برای مرکز کنترل و رایانش تاب‌آور خطا ۱۰۲

۷-۱ مراکز کنترل متعارف ۱۰۲
۷-۲ مراکز کنترل مدرن ۱۰۴
۷-۳ مراکز کنترل آینده ۱۰۶
۷-۴ UML، XML، RDF و CIM ۱۰۷
۷-۵ مبانی رایانش تحمل پذیر- خطا ۱۱۴
۷-۶ رایانش ابری ۱۱۷
۷-۷ خلاصه فصل ۱۱۹
۷-۸ سئوالات چند گزینه ای ۱۱۹
۷-۹ سئوالات تشریحی ۱۲۰
منابع مطالعه بیشتر ۱۲۰

فصل ۸- مفاهیم پایه امنیتی، پروتکل های رمزنگاری و کنترل دسترسی ۱۲۱

۸-۱ مقدمه ۱۲۱
۸-۲ مفاهیم پایه امنیت سایبری و تهدیدات سیستم های قدرت ۱۲۱
۸-۳ سه گانه CIA و دیگر ویژگی های امنیتی محوری ۱۲۴
۸-۴ مقدمه ای بر رمزگذاری و احراز هویت ۱۳۲
۸-۵ رمزنگاری در سیستم های قدرت ۱۳۶
۸-۶ کنترل دسترسی ۱۴۱
۸-۷ خلاصه فصل ۱۴۴
۸-۸ سئوالات چند گزینه ای ۱۴۴
۸-۹ سئوالات تشریحی ۱۴۵
منابع مطالعه بیشتر ۱۴۵

فصل ۹- حملات به و حفاظت از شبکه ۱۴۶
۹-۱ حمله به ارتباطات شبکه ۱۴۶
۹-۱-۱-۳ حمله بازتابی ۱۴۸
۹-۲ مکانیسم های احیاء در مقابل حملات شبکه ۱۵۲
۹-۳ حفاظت شبکه از طریق فایروال ها ۱۵۷
۹-۴ تشخیص نفوذ (تهاجم) ۱۵۸
۹-۵ خلاصه فصل ۱۶۱
۹-۶ سئوالات چند گزینه ای ۱۶۲
۹-۷ سئوالات تشریحی ۱۶۳
منابع مطالعه بیشتر ۱۶۳

فصل ۱۰- آسیب پذیری ها و مدیریت ریسک ۱۶۴
۱۰-۱ آسیب پذیری های سیستم ۱۶۴
۱۰-۲ مکانیسم های امنیتی: کنترل دسترسی و شناسایی بدافزار ۱۷۴
۱۰-۳ اطمینان و ارزشیابی ۱۷۷
۱۰-۴ انطباق: اقدام صنعتی برای پیاده سازی NERC CIP ۱۸۳
۱۰-۵ خلاصه فصل ۱۸۴
۱۰-۶ سئوالات چند گزینه ای ۱۸۴
۱۰-۷ سئوالات تشریحی ۱۸۵
منابع مطالعه بیشتر ۱۸۵

فصل ۱۱- مطالعات موردی شبکه هوشمند ۱۸۶
۱۱-۱ پروژه های نمایشی شبکه هوشمند ۱۸۶
۱۱-۲ سنجه های شبکه هوشمند ۱۸۹
۱۱-۳ چالش های شبکه هوشمند: مطالعات موردی حمله ۱۹۰
۱۱-۳-۱ استاکس نت ۱۹۰
۱۱-۴ احیاء با استفاده از چارچوب امنیت سایبری NIST ۱۹۴
۱۱-۵ خلاصه فصل ۱۹۶
۱۱-۶ سئوالات چند گزینه ای ۱۹۶
۱۱-۷ سئوالات فصل ۱۹۷
منابع مطالعه بیشتر ۱۹۷

کلمات اختصاری

ASTA	زمان ورود، متوسط زمان را نیز ببینید
BHCA	تلاش برای تماس در ساعات شلوغ
BR	رزرو پهنای باند
b.u.	واحد(های) پهنای باند
CAC	کنترل پذیرش تماس / اتصال
CBP	احتمال مسدود شدن تماس (ها)
CCS	تماس اشغال کننده کانال بمدت صد ثانیه
CDTM	مدل آستانه وابسته به اتصال
CS	اشتراک گذاری کامل
DiffServ	خدمات متفاوت (افتراقی)
EMLM	مدل افت چند نرخی ارلنگ
erl	واحد بار ترافیک ارلنگ
FIFO	خروج به ترتیب ورود
GB	تعادل جهانی
GoS	گرید خدمات
ICT	فناوری اطلاعات و ارتباطات
IntServ	خدمات یکپارچه (تلفیقی)
ITU-T	واحد بین المللی مخابرات – حوزه استانداردسازی
IP	پروتکل اینترنت
LIFO	خروج آخری با ورود اولی

LHS	سمت چپ
LB	تعادل محلی
MMPP	فرآیند پواسون مدوله شده مارکوف
MPLS	سوئیچینگ لیبلینگ چند پروتکلی
MRM	مدل چند تکراری
MTM	مدل چند آستانه ای
PASTA	ورود پواسون، متوسط زمان را ببینید
pdf	تابع چگالی احتمال
PDF	تابع توزیع احتمال
PFS	راه حل فرم محصول
QoS	کیفیت خدمات
RED	تشخیص زودهنگام تصادفی
r.v.	متغیر(های) تصادفی
RLA	تقریب بار کاهشی
RHS	سمت راست
SIRO	سرویس به ترتیب تصادفی
SRM	مدل تک امتحانی
STM	مدل تک آستانه ای
TH	آستانه(ها)
TCP	پروتکل هدایت انتقال
UDP	پروتکل دیتاگرام کاربر



مقدمه ای بر شبکه هوشمند

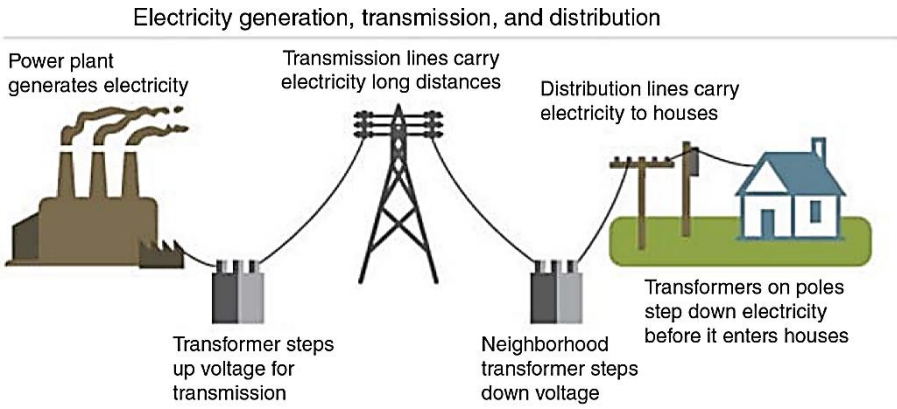
شبکه برق از یک سیستم فیزیکی به یک سیستم «سایبری-فیزیکی» متحول شده است تا بتواند اقدامات حس کردن، برقراری ارتباط، محاسبه و کنترل را با دیجیتالی شدن پیشرفته امکانپذیر سازد. شبکه هوشمند فیزیکی سایبری شامل اجزایی از سیستم قدرت فیزیکی، دستگاه‌های دیجیتال و زیرساخت‌های ارتباطی مربوطه است. برای تحقق چشم انداز شبکه هوشمند، حجم عظیمی از داده ها باید از دستگاه های میدانی به دستگاه های کنترل یا مراکز کنترل منتقل شود. از آنجایی که الگوریتم‌های بهینه‌تر برای بهترین کنترل ممکن در مقیاس زمانی سریع‌تر به کار گرفته می‌شوند، زیرساخت ارتباطی برای ارائه ورودی‌های مورد نیاز حیاتی می‌شود. در عین حال، افزایش تعداد دستگاه‌های «هوشمند» در شبکه، سطح حمله را برای حملات سایبری بالقوه افزایش می‌دهد. در این راستا مطالعه مواجهه سیستم قدرت با خطرات و آسیب‌پذیری‌ها در سیستم سایبری مرتبط ضروری می نماید.

۱-۱ بازنگری شبکه برق قدرت

شبکه برق را می توان به عنوان کل تجهیزات، سیم ها و ماشین هایی تعریف کرد که منابع برق را به مشتریان متصل می کند. یک شبکه برق به طور کلی به چهار عنصر اصلی تقسیم می‌شود که در شکل ۱-۱ آمده است:

۱) تولید
۲) انتقال
۳) توزیع
٤) بارها

الکتریسیته برای اولین بار در دهه ۱۸۷۰ از طریق مدارهای جریان مستقیم (DC)[1] در فواصل بسیار کوچک تولید، فروخته و به صورت محلی توزیع شد. همانطور که تقاضای برق بیشتر می‌شد، هزینه ساخت و توزیع مدارهای تولید محلی و DC برای حمل برق در فواصل طولانی بسیار گران شد. از این رو، تولید، انتقال و توزیع جریان متناوب (AC)[2] به استانداردی تبدیل شد که تا به امروز مورد استفاده قرار می گیرد. هرچند زیرساخت شبکه برق در حال پیرتر شدن است (میانگین سن یک ترانسفورماتور بیشتر از ۵۰ سال است و در حال حاضر از عمر مورد انتظار خود فراتر رفته است). شبکه برق با مشکلات متعددی مواجه است، از جمله مشکل بازنشستگی آتی حداقل ۵ درصد از نیروی کار و یکی از کمترین هزینه های تحقیق و توسعه در مقایسه با سایر زیرساخت های حیاتی.



شکل ۱-۱ اجزای اصلی شبکه برق [منبع: مدیریت اطلاعات انرژی (EIA)، حوزه عمومی]

هرچند با افزایش توجه به امنیت ملی و اذعان نقش حیاتی که شبکه برق در کیفیت کلی زندگی ایفا می کند، وضعیت در حال بهبود است. در یک دور کامل، تولید محلی با استفاده از منابع انرژی توزیع شده (DER)[3] با ترکیبی از هر دو سیستم AC و DC در حال بازگشت است. سیستم‌های تولید امروزی ترکیبی از انواع مختلف منابع هستند (از جمله سوخت‌های فسیلی، گاز طبیعی، منابع تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای). این سیستم های تولید بخاطر سهولت انجام کار و به دلایل زیست محیطی، اغلب در مناطق دور افتاده واقع شده اند.

[1] Direct Current
[2] Alternating Current
[3] Distributed Energy Resources

نیروی تولید شده در ایستگاه های تولید توسط شبکه پیچیده ای از خطوط انتقال به مصرف کنندگان می رسد. شبکه برق آمریکای شمالی شامل چهار اتصال اصلی است که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است:

۱) تقاطع اتصال غربی
۲) تقاطع اتصال شرقی
۳) تقاطع اتصال کبک
٤) تقاطع اتصال به شورای پایایی برق تگزاس (ERCOT)[1]

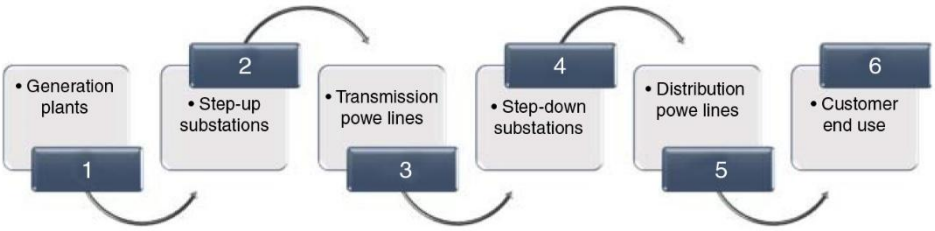
این تقاطع اتصالات، مناطقی هستند که در آنها تاسیسات برق به صورت الکتریکی به هم متصل می شوند، که نشان می دهد مناطق با فرکانس یکسان هماهنگ شده اند و قدرت می تواند آزادانه در آن منطقه جریان یابد. این اتصالات تقریباً مستقل از یکدیگر عمل می کنند به جز برخی از اتصالات جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC)[2] بین آنها. پست‌های مبدل DC، انتقال همگام توان را در سراسر اتصالات بدون توجه به فرکانس کاری امکان‌پذیر می‌سازند، زیرا برق DC غیروابسته به فاز است.



[1] Electricity Reliability Council of Texas
[2] High-Voltage Direct Current

شکل ۱-۲ تقاطع اتصالات شبکه برق آمریکای شمالی
[منبع: شرکت پایایی انرژی آمریکای شمالی (NERC)، حوزه عمومی]

جریان الکتریسیته آنی است و نشان می دهد نیرویی که مصرف می شود نیز به طور همزمان تولید می شود. مکانیسم‌های تجاری بادوام برای ذخیره‌سازی برق به مدت طولانی‌تر در حال حاضر وجود ندارد. از این رو نیروگاه ها و شبکه به طور مداوم در حال فعالیت هستند. ساختار جریان یافتن الکتریسیته در شکل ۱-۳ نشان داده شده است که ماهیت حیاتی سیستم انتقال را در رساندن برق از نیروگاه های تولید به مصرف مشتری نشان می دهد.

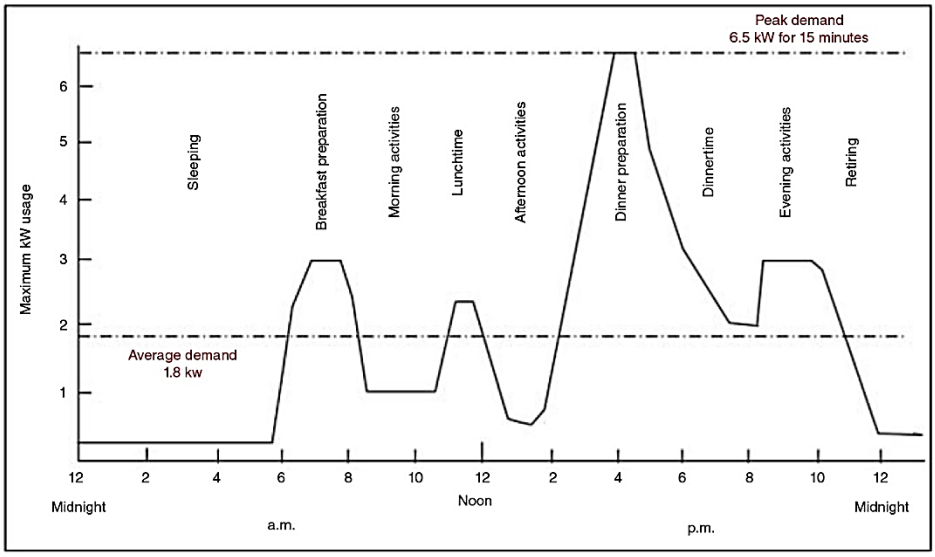


شکل ۱-۳ ساختار جریان برق از ایستگاه های تولید به مصرف کنندگان

تقاضای برق در طول روز و با توجه به رفتار مصرف کننده، بطور مداوم در نوسان است. عوامل مختلفی وجود دارد که این رفتار در حال تغییر را ایجاد می کند، از جمله تراکم جمعیت، برنامه کاری، آب و هوا و سایر فعالیت ها. علاوه بر این، فعالیت های ویژه ای که شامل تعداد زیادی از افراد می شود نیز باید در نظر گرفته شوند، مانند رویدادهای ورزشی بزرگ یا رویدادهای آب و هوایی قریب الوقوع در یک منطقه بزرگ. در شکل ۱-٤ یک منحنی «بار» معمولی روزانه آمده است که نشان می دهد چگونه بار الکتریکی در طول یک روز بسته به فعالیت‌های طول روز تغییر می کند. اوج تقاضا در اوایل غروب زمانی رخ می دهد که افراد از کار برمی‌گردند و مشغول فعالیت های خانوادگی یا تهیه شام هستند. تقاضای برق در طول روز بسته به فعالیت‌های دیگر افزایش و کاهش می‌یابد، مانند اوج زمانی که مردم برای کار آماده می‌شوند و یا در هنگام خواب. این منحنی‌های بار به طور مداوم توسط شرکت‌ها و اپراتورها برای برنامه‌ریزی عملیات شبکه پایش و پیش‌بینی می‌شوند و در فواصل زمانی منظم به‌روزرسانی می‌شوند تا تغییرات رفتاری مانند همه‌گیری COVID-19 را در نظر بگیرند.

سیستم توزیع برق آخرین مرحله انتقال برق از پست ها به مصرف کننده است. سه جزء شبکه برق معمولاً با سطوح ولتاژی که در آن کار می کنند، تعریف می شوند. تولید در ایستگاه‌های تولید در ولتاژهای پایین اتفاق می افتد، به دنبال آن برق بلافاصله به ولتاژهای بسیار بالاتر در محل

تبدیل می شود. نیروگاه های تولید برق را از جایی که افزایش می دهند تا ۲۰۰۰۰ ولت می فرستند و به دنبال آن به شبکه انتقال تغذیه می شوند که در آنجا می توان آنها را تا ۷۶۵۰۰۰ ولت افزایش داد که معمولاً نوشته می شود و به آن ۷۶۵ کیلو ولت می گویند. توان به این مقادیر بسیار بالا افزایش می یابد تا تلفات در انتقال کاهش یابد که با جریان نسبت مستقیم و با ولتاژ نسبت معکوس دارد. پست سیستم توزیع در سطح ۱۳.۲ کیلوولت در نظر گرفته می‌شود (یا می تواند بالاتر باشد)، به دنبال آن ولتاژ پایین می آید تا به مصرف کنندگان ارسال شود. این ساختار در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴ منحنی های بار برای یک روز معمولی

[منبع: وزارت انرژی ایالات متحده، دفتر تحویل برق و پایایی انرژی]

مراکز کنترل انرژی به طور سنتی مراکز تصمیم گیری برای مراکز تولید و انتقال برق هستند. این مراکز توسط سطح وسیعی از اندازه‌گیری‌های SCADA (کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده‌ها)[1] و سایر سیستم‌های اندازه‌گیری و مراکز کنترل داده تغذیه می‌شوند. اپراتور(های) مرکز کنترل بخش کلیدی از عملیات کلی شبکه با مسئولیت‌های مختلف می باشند، که شامل موارد زیر می‌شود، اما به آنها محدود نمی‌شود:

[1] Supervisory Control and Data Acquisition

۱) پایش و واکنش به شاخص‌های کلیدی عملکرد سیستم از قبیل ولتاژ، فرکانس، کیفیت توان و سایر معیارها (مانند سنجه های پایایی)[1]

۲) پاسخ به شرایط اضطراری و هشدارها – اپراتور سیستم کنترل بایستی به هشدارهای الگوریتم ها و برنامه های مختلف در حال اجرا در مرکز کنترل رسیدگی کنند. بعلاوه، آنها با شرایط اضطراری مانند برخورد درختان به خطوط انتقال یا آتش سوزی به دلیل نقص تجهیزات سروکار دارند

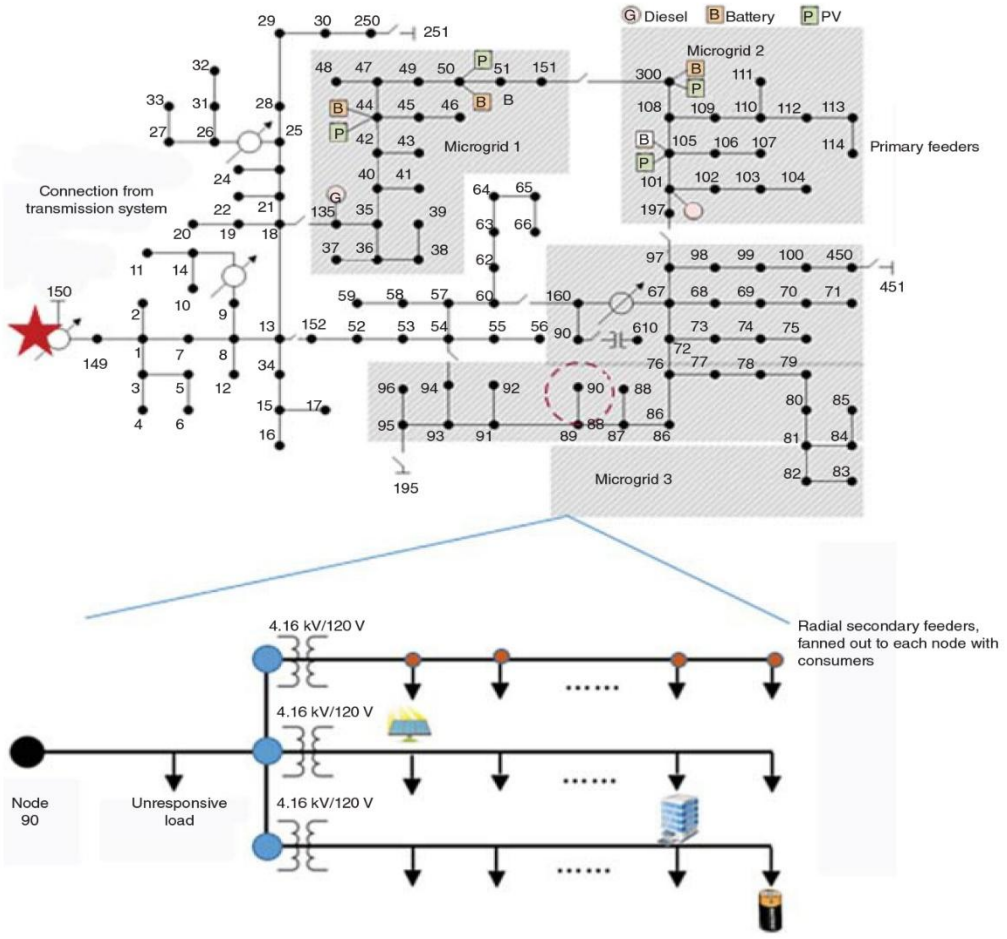
۳) اطمینان از پایایی سیستم از طریق برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری تجهیزات با پیش‌بینی خرابی‌ها

٤) پاسخ به درخواست های مشتریان بزرگتر از قبیل صنایع یا زیرساخت ها. این می تواند یک مصرف کننده بزرگتر باشد که در حال تست تولید پشتیبان یا بارهای زیرساختی خود مانند سیستم حمل و نقل است.

۵) هماهنگی با سایر ذینفعان، از قبیل شرکت های تولید، اپراتورهای انتقال، تاسیسات، و خدمه تعمیر و نگهداری برای اطمینان از عملکرد یکپارچه.

٦) اطمینان از انطباق عملکرد سیستم با مقررات سیستمی وضع شده توسط مقاماتی مانند FERC و NERC

[1] Reliability Metrics



شکل ۱-۵ سطوح ولتاژ در شبکه برق

به طور خلاصه، سیستم کنترل مسئول اطمینان از تولید، انتقال و توزیع برق به شیوه ای ایمن و پایا به مصرف کنندگان است. این سیستم با نظارت بر عملکرد و واکنش به مشکلات، کلیه عملیات سیستم را با سایر ذینفعان هماهنگ می کند و اطمینان حاصل می کند که عملکرد آن در هر موردی با مقررات مطابقت دارد.

۱-۱-۱ عملیات شبکه برق

سیستم قدرت با پشتیبانی مجموعه‌ای از «اپلیکیشن‌های» قدرت، که الگوریتم‌های پایش و کنترل مستتر در ابزارهای نرم‌افزاری هستند و بر اساس قوانین فیزیک تعبیه شده‌اند، کار می‌کند. این الگوریتم ها به اپراتور اجازه می دهد تا وضعیت شبکه برق را در آن لحظه درک کند و اپراتور را قادر می سازد تا تصمیماتی اتخاذ کند که بتواند شبکه را به دلخواه کنترل کند. چندین اپلیکیشن

سیستم قدرت وجود دارد که برای عملکرد آن حیاتی هستند و چندین مورد دیگر بر اساس فناوری های جدیدی که در شبکه به کار می روند، توسعه یافته اند. درک برنامه های اصلی کلیدی مهم است، زیرا این امر درک عمیق تر برنامه های جدیدتر در شبکه هوشمند را امکان‌پذیر می سازد. چند نمونه از این برنامه ها عبارتست از:

۱) جریان برق
۲) برآورد حالت
۳) جریان قدرت بهینه و ارسال اقتصادی
٤) تداوم جریان برق
٥) کنترل تولید خودکار (AGC)[1]
٦) تجزیه و تحلیل پایداری

جریان توان الگوریتمی است که ولتاژ مختلط را در هر گره در یک شبکه با توجه به تزریق توان ژنراتور و نقاط تنظیم ولتاژ، نیازهای توان اکتیو و راکتیو بار و امپدانس های شبکه تعیین می‌کند. راه حل جریان قدرت بر اساس قوانین کیرشهوف[2] است. تکنیک های راه حل متعددی برای حل جریان توان وجود دارد که رایج ترین آنها عبارتند از: (۱) تکنیک نیوتن–رافسون[3]، (۲) تکنیک گاوس–سایدل[4] و (iii) جریان بار جدا شده سریع (FDLF)[5]. همچنین تکنیک‌هایی منحصر به سیستم‌های توزیع وجود دارد که شعاع شبکه‌ها را در نظر می‌گیرند که شامل تکنیک‌هایی مانند تکنیک رفت و برگشت رو به عقب است.

روش نیوتن–رافسون در حل جریان توان نیازمند تشکیل یک ماتریس گرادیان به نام ژاکوبین[6] است. ماتریس ژاکوبین با حذف باس شل (که باس مرجعی است که زوایای ولتاژ از آن تعیین می شود) و باس های ولتاژ از داده های باس تشکیل می شود. ماتریس ژاکوبین در واقع ترکیبی از چهار ماتریس مختلف است: توان واقعی (P) و توان راکتیو (Q) با توجه به ولتاژ (V) و زاویه (θ) متمایز می شوند. ولتاژ و زوایای به روز شده با ضرب معکوس ژاکوبین در تغییرات P و Q مشخص می شود. فرآیند فوق تا زمانی تکرار می شود که اختلاف بردارهای عدم تطابق (ΔP و ΔQ) برای تکرارهای متوالی به اندازه کافی از مقدار تحمل کوچک تر باشد. در این حالت مقدار

[1] Automatic Generation Control
[2] Kirchhoff's Laws
[3] Newton–Raphson Technique
[4] Gauss–Seidel Technique
[5] Fast Decoupled Load Flow
[6] Jacobian Matrix

تلورانس ۰.۰۱ تعیین می شود. این نشان می دهد که راه حل جریان قدرت تا 0.01 pu دقیق است که شرایط تحمل پذیرفته شده است. تکنیک جریان توان جدا شده سریع شبیه به روش نیوتن-رافسون است، با این تفاوت که ژاکوبین ثابت می ماند. این امر از طریق دو پیش فرض به دست می آید:

۱. مقاومت R برابر صفر است $(R = 0)$

۲. تفاضل زوایای $\theta i - j$ برابر صفر است $(\theta i - \theta j = 0)$

این دو پیش فرض با هم نشان می دهد که J11 و J22 (اجزای مورب ژاکوبین) ثابت می مانند و برابر با قسمت خیالی باس Y است. از این رو، برای روش FDLF، ژاکوبین در طول فرآیند تکرار ثابت می ماند. مانند روش نیوتن-رافسون، روش FDLF نیز به بردار عدم تطابق نگاه می‌کند تا بفهمد چه زمانی باید تکرار را متوقف کند. به دلیل مفروضات ارائه شده در راه حل، روش FDLF تکرارهای بیشتری را برای همگرایی انجام می دهد، اما سریعتر محاسبه می شود زیرا ژاکوبین بدون تغییر باقی می ماند.

ادامه یافتن جریان برق برای تعیین پایداری سیستم استفاده می شود. در تداوم جریان برق، جریان توان به طور پیوسته با تغییر شرایط بار برای هر بار حل می شود. این در جریان قدرت معمول امکان پذیر نیست زیرا ژاکوبین پس از مدتی مفرد می شود. برای حل این مشکل، از تکنیک پیش بینی- تصحیح کننده استفاده می شود.

برای یافتن وضعیت سیستم از تخمین حالت استفاده می‌شود. سنجه‌های معمول مورد استفاده عبارتند از: ولتاژ (V)، توان واقعی (P) و راکتیو (Q) و جریان‌های خط $(P_{ij}, P_{ji}, Q_{ij}, Q_{ji})$ از هر دو انتهای خط. ماتریس ترکیبی همه این اندازه‌گیری‌ها ماتریس Z نامیده می‌شود. در این اندازه‌گیری‌ها معمولاً مقداری خطا وجود دارد، از خرابی تجهیزات یا از دست دادن داده‌ها در ارتباطات. تخمین حالت را می‌توان از طریق تکنیک‌های مختلفی انجام داد، اما رایج‌ترین روش، روش حداقل مربعات وزنی (WLS)[1] است، که اجازه می‌دهد تا اندازه‌گیری‌ها را برای محاسبه اندازه‌گیری‌های نادرست وزن کنیم. یکی دیگر از بخش‌های مهم تخمین حالت، تشخیص داده‌های بد در اندازه‌گیری‌ها است و رایج‌ترین روش برای این کار، آزمون آماری مجذور کای است. این آزمون احتمال وجود یک

[1] Weighted Least Squares

مقدار در خارج از محدوده معین را برای درجه آزادی و صحت مشخص، مورد بررسی قرار می دهد.

این اپلیکیشن های سیستم قدرت با هم اپراتور را قادر می سازد تا از وضعیت شبکه آگاهی داشته باشد و آنها را قادر می سازد تا اقدامات کنترلی را برای کاهش هر گونه مشکل انجام دهند. در زمینه شبکه هوشمند، توجه به این نکته مهم است که به دلیل افزایش نیازهای برنامه، جدول زمانی برای برنامه های سیستم قدرت کوتاه تر می شود.

۱-۲ چه چیزی در عملیات شبکه برق ممکن است اشتباه شود

زیرساخت شبکه برق گسترده است، در یک منطقه جغرافیایی گسترده پراکنده است و از اجزای مختلفی تشکیل شده است. با توجه به مقیاس شبکه برق، در معرض تهدیدات مختلفی قرار دارد و آسیب پذیری های متعددی دارد. در حالی که شبکه برق با افزونگی های متعدد طراحی شده است تا با وجود موارد محتمل مختلف کار کند، هنوز هم ممکن است دچار خرابی شود. این خرابی ها اغلب در نتیجه عدم عملکرد عناصر شبکه برق مطابق انتظار یا به دلیل اختلالات خارجی است. خرابی‌ها می‌توانند در اجزای منفرد مانند ژنراتورها، خطوط انتقال و تجهیزات اندازه‌گیری و پایش رخ دهند یا ممکن است در چندین قطعه اتفاق بیفتند. به طور کلی، هنگامی که این خرابی ها در سطح انتقال رخ می دهد، به آنها «خطا» می گویند. خطاهای مختلفی در شبکه ممکن است ناشی از منابع خارجی یا داخلی باشد:

۱) رعد و برق
۲) باد و برف
۳) خراب شدن مواد (عایق ها، هادی ها و غیره)
٤) درختان
٥) تصادفات وسایل نقلیه موتوری (مانند برخورد ماشین افراد با تیرهای برق)
٦) خطاهای انسانی (اشتباه در تفسیر موقعیت ها و اقدامات کنترل نادرست)
۷) حملات سایبری
۸) حیوانات (عمدتاً سنجاب ها)

خطاها موقعیت‌های خطرناکی هستند زیرا تا حد زیادی کنترل نشده‌اند و می‌توانند منجر به موقعیت‌های خطرناکی مانند فلاش قوس شوند. اینها می توانند برای افراد کشنده باشند و باعث آسیب هزینه بالا به تجهیزات شوند که تعمیر آنها اغلب زمان زیادی می برد.

از این رو، شبکه برق دارای سطوح مختلفی از «محافظت» به عنوان اولین خط دفاعی است. این سیستم‌های حفاظتی سعی می‌کنند خطاها را از بقیه شبکه برق جدا کنند تا (۱) جریان انرژی به منطقه آسیب‌دیده را متوقف کنند و (۲) از آبشاری شدن خطا به سایر بخش‌های شبکه جلوگیری کنند. تجهیزات حفاظتی عمدتاً یا (۱) فیوزها یا (۲) قطع کننده‌های مدار می باشند.

فیوزها بیشتر در مدارهای توزیع استفاده می شوند. آنها قادر به شناسایی و جداسازی خطاها هستند، اما انعطاف پذیری کمتری دارند. آنها سیم هایی با طراحی و درجه بندی ویژه هستند که وقتی جریان عبوری از آنها بیشتر از تحمل مشخص شده باشد ذوب می شوند. هرچند نصب فیوزها بسیار ساده و ارزان است، اما مشکل فیوزها این است که در صورت «فعال شدن» نیاز به تعویض دارند، زیرا به سادگی ذوب می شوند تا اتصال الکتریکی قطع شود. به همین دلیل، فیوزها در مدارهای توزیع که خاموشی تعداد کمتری از افراد را تحت تأثیر قرار می دهد، بیشتر است.

قطع کن‌های مدار و کلیدها انواع مختلفی دارند، اما تفاوت عمده با فیوزها این است که قابل استفاده مجدد هستند و گاهی اوقات می توان آنها را از راه دور فعال کرد. کلیدهای مدار در پشت سر هم با یک رله کار می کنند که عملکردهای سنجش و پایش را انجام می دهد. رله وظیفه تشخیص وجود عیب را با نظارت بر جریان و سایر عوامل و ارسال یک سیگنال «تریپ» به مدار شکن دارد که سپس با «باز کردن» مدار، اتصال الکتریکی را قطع می کند. رله‌ها اغلب توسط مکانیسم‌های پیچیده‌ای برای تشخیص طیف وسیعی از خطاها برنامه‌ریزی یا تنظیم می‌شوند. اینها به عنوان «طرحهای حفاظت رله» نامیده می شوند که نمونه های آنها شامل طرح حفاظت از راه دور، حفاظت در برابر ولتاژ یا اضافه ولتاژ و حفاظت ژنراتور است. مدار قطع کن‌ها می‌توانند دستگاه های مکانیکی یا حالت جامد باشند. آنها همچنین در سطح ولتاژ پایین، معمولاً در پانل های شکن در خانه ها مستقر می شوند. هرچند این دستگاه های ولتاژ پایین با دستگاه های ولتاژ بالا متفاوت هستند، اگرچه هر دو با جداسازی عیب از بقیه مدار در هنگام تشخیص عیب کار می‌کنند. در شبکه هوشمند، قطع کننده های مدار هوشمند در همه جا فراگیرتر می شوند، به خصوص در مکان هایی که اغلب قطع کننده ها قطع می شوند. قطع کننده های مدار هوشمند اپراتور را قادر می سازد تا آن را از مرکز کنترل از راه دور اداره کند، بنابراین زمان انرژی دادن به مدار پس از یک خطا را به میزان قابل توجهی در مقایسه با ارسال کامیون تعمیر و نگهداری برای روشن کردن مجدد آن، کاهش می دهد.

۱-۳ آموختن از وقایع گذشته

زیرساخت شبکه برق نسبت به سایر منابع حیاتی مانند آب منحصر به فرد است، زیرا شبکه برق نمی تواند برق را در هیچ نقطه ای از سیستم به صورت عمده ذخیره کند. اگرچه باتری ها قادر به ذخیره الکتریسیته هستند، اما نمی توانند آن را برای مدت طولانی نگه دارند و فرآیند ذخیره سازی و بازیابی برق از باتری ها ذاتاً با تلفات همراه است. علاوه بر این، داشتن باتری در مقیاس بزرگ هنوز یک پیشنهاد گران برای شبکه برق است. این کمبود ذخیره سازی حاکی از آن است که وقتی خرابی در شبکه برق رخ می دهد، زمان بسیار محدودی برای پاسخ به چنین خرابی هایی وجود دارد.

برق مورد استفاده مصرف کننده در هر لحظه تولید می شود و نمی توان در فرآیند تولید مکث کرد. هنگامی که یک خطا در شبکه رخ می دهد، بقیه منابع تولید کننده باید فورا تولید خود را افزایش دهند تا اطمینان حاصل شود که کمبود پوشش داده می شود. از آنجایی که ژنراتورها معمولاً ماشین‌های دوار عظیمی هستند که برق AC تولید می‌کنند، اینرسی ذاتی را برای شبکه فراهم می‌کنند که کمبودها را برای چند سیکل برطرف می‌کند. در همین حال، از آنجایی که شبکه به طور همزمان در فرکانس یکسان کار می کند، سایر ژنراتورهای متصل سعی می کنند زمانی که از دست دادن یک ژنراتور منجر به افت فرکانس شود، سریعتر بچرخند. هرچند هنگامی که کمبود به سرعت از طریق پاسخ‌های خودکار یا از طریق اقدامات کنترل اپراتور کاهش نمی‌یابد، ژنراتورها از هماهنگی خارج می‌شوند و منجر به از دست دادن انتقال برق و قطع شدن مصرف‌کنندگان از شبکه می‌شود. این وضعیت به عنوان «قطع برق» نامیده می شود. جدول ۱-۱ فهرستی از خاموشی های معروف را نشان می دهد که منجر به محرومیت تعداد زیادی از مردم از برق شده است. خاموشی منجر به موقعیت های تهدید کننده زندگی با عواقب اقتصادی فوق العاده می شود.

جدول ۱-۱ لیست خاموشی های معروف در سراسر جهان.

مکان	تاریخ (ماه/روز/سال)	مقیاس (MW یا جمعیت)	زمان خاموشی
US – Northeast	10–11/9/65	20,000 MW, 30 M	13 minutes
New York	7/13/77	6,000 MW, 9 M	1 hour
France	1978	29,000 MW	26 minutes
Japan	1987	8,200 MW	20 minutes
US – West	07/02/96	11,700 MW	36 seconds
US – West	8/10/96	30,500 MW	>6 minutes
Brazil	3/11/99	25,000 MW	30 seconds

US – NE	8/14/03	62,000 MW, 50 M	>2 hour
London	8/28/03	724 MW, 476 K	8 seconds
Denmark and	9/23/03	6,500 MW, 4 M	7 minutes
Italy	9/28/03	27,700 MW, 57 M	27 minutes
India	7/30/12	48,000 MW, 600 M	>6 hours
Brazil	03/21/18	18,000 MW, 10 M	>4 hours
Ukraine	12/23/15	73 MW, 230 K	6 hours
US – Texas	2/2021	15,000–20,000 MW	hours–days (rolling)

ثابت شده است که خاموشی ها اغلب لحظاتی مولد در عملیات شبکه می باشند. مثلاً خاموشی ۱۹۶۵ در شمال شرقی ایالات متحده منجر به توسعه مراکز کنترل مدرن، با اندازه گیری های وسیع و آگاهی و کنترل موقعیتی بهتر شد. به طور مشابه، خاموشی سال ۲۰۰۳ نیز یک رویداد مهم در عملکرد شبکه برق، به ویژه در ایالات متحده است. خاموشی آگوست ۲۰۰۳ یکی از بزرگترین خاموشی ها در تاریخ است و ۲۶۳ نیروگاه (۵۳۱ واحد) را در ایالات متحده و کانادا تعطیل کرد. بیش از ۵۰ میلیون نفر را در زمان‌های مختلف بدون برق رها کرد و هشت ایالت در ایالات متحده (میشیگان، اوهایو، پنسیلوانیا، نیویورک، ورمونت، ماساچوست، کانکتیکات و نیوجرسی) و استان انتاریو در کانادا را تحت تأثیر قرار داد. تقریباً ۶۲۰۰۰ مگاوات بار از بین رفت و برق تا ۲ ساعت پس از خاموشی دوباره برقرار شد، در حالی که سایر افراد تا ۱۴ روز بدون برق باقی ماندند. یک توالی ساده از رویدادها به شرح زیر است:

۱) ساعت ۱:۳۰ – از دست دادن ژنراتور دریاچه شرقی به دلیل تحریک بیش از حد
۲) ساعت ۲:۰۲ – از بین رفتن خط انتقال استوارت–آتلانتا به دلیل تماس با درخت
۳) ساعت ۲:۰۲ – مدل سیستم ISO غرب میانه نادقیق می شود و تغییرات حوزه را منعکس نمی‌کند.
۴) ساعت ۲:۱۴ تا ۳:۰۸ – اشکال نرم افزاری در مرکز کنترل FirstEnergy، که منجر به هشدارهای مداوم برای بیش از یک ساعت می شود که بدون توجه رها می شود.
۵) ساعت ۳:۰۵ – از بین رفتن خط انتقال هاردینگ–چمبرلین به دلیل تماس با درخت
۶) ساعت ۳:۳۲ – از بین رفتن خط انتقال هانا–جونیپر به دلیل تماس با درخت
۷) ساعت ۳:۴۱ – از دست دادن ستاره-اس. خط انتقال کانتون به دلیل تماس با درخت
۸) ساعت ۴:۰۶ – از بین رفتن خط انتقال سامیس–استار به دلیل عملکرد نادرست سیستم حفاظتی، که در آن اضافه بار زیاد روی خط به اشتباه به عنوان خطا در منطقه ۳ سیستم حفاظتی تشخیص داده شد.

به دلیل یک مجموعه اولیه از خطاها که کشف نشدند، نوسانات ولتاژ و جریان و جریان های بسیار بالا به دلیل بارهای بالای خط انتقال، منجر به قطع شدن بسیاری از خطوط انتقال گردید. آنها گاهی اوقات به دلیل هماهنگی نادرست در تنظیمات سیستم حفاظتی، به اشتباه خاموش می‌شدند، که منجر به بسیاری از سفرهای نادرست منطقه ۳ می شد، جایی که جریان های بسیار بالا به اشتباه به عنوان جریان های خطا تعبیر شدند. هنگامی که چند ژنراتور شروع به خاموش شدن کردند، عدم تعادل تولید بار باعث کاهش فرکانس در سیستم و ولتاژهای پایین تر شد. سپس ژنراتورها به دلیل این فرکانس، تحریک بیش از حد و شرایط خارج از مرحله شروع به خاموش شدن کردند و ژنراتورها شروع به از دست دادن همزمانی با شبکه کردند.

خاموشی های سال ۲۰۰۳ منجر به تحقیقی بزرگ در عملیات سیستم قدرت شد و منجر به تغییرات قابل توجهی شد. کمیته ای این حادثه را بررسی کرد و به چندین دلیل اصلی خاموشی رسید که شامل موارد زیر می شود:

۱) آگاهی موقعیتی کافی در FirstEnergy (FE) وجود نداشت. FE وضعیت رو به وخامت سیستم خود را تشخیص نداد / درک نکرد.
۲) FE نتوانست رشد درخت را در مسیر حق انتقال خود به اندازه کافی مدیریت کند.
۳) قصور سازمان‌های پایایی شبکه متصل (عمدتا MISO) در ارائه پشتیبانی تشخیصی مؤثر در زمان واقعی.
٤) FE و سازمان پایایی منطقه مرکزی شرقی (ECAR) نتوانستند نارسایی‌های سیستم FE را ارزیابی و درک کنند، بویژه با توجه به ناپایداری ولتاژ و آسیب‌پذیری منطقه کلیولند-اکرون و FE سیستم خود را با معیارهای ولتاژ مناسب فعال نکرد.
۵) هیچ مطالعه برنامه ریزی بلندمدتی برای شرایط اقتضایی یا افراطی شدید انجام نشده بود
٦) هیچ آنالیز ولتاژی برای منطقه اوهایو انجام نشده و از معیارهای ولتاژ عملیاتی نامناسب استفاده می شد.
۷) هیچ بررسی یا تحلیل مستقلی از معیارهای ولتاژ FE و نیازهای عملیاتی انجام نشده بود
۸) برخی از الزامات برنامه ریزی و عملیاتی NERC مبهم بودند

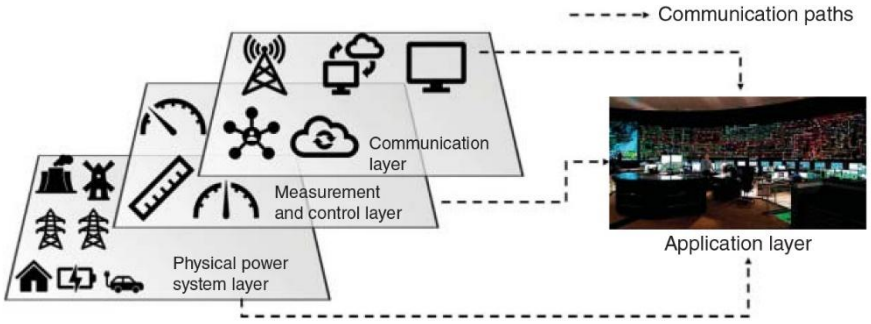
خاموشی منجر به این شد که دولت فدرال ایالات متحده مفاد پایایی را در قانون سیاست انرژی خود در سال ۲۰۰۵ لحاظ کند. دستورالعمل های عملیاتی NERC که قابل اجرا نبودند به ملزومات اجباری برای ارائه دهندگان برق ایالات متحده تبدیل شدند که باید رعایت می شدند. این منجر به تغییرات گسترده در عملکرد آنها و آگاهی بیشتر در بین مردم و مقامات در مورد سهولت از بین

بردن شبکه شد. توسعه یک شبکه هوشمند را می توان به نوعی یکی از اثرات خاموشی سال ۲۰۰۳ دانست.

۱-٤ به سوی شبکه الکتریکی هوشمندتر

برای کاهش خرابی‌های احتمالی، یک عنصر کلیدی دستیابی به آگاهی موقعیتی بهتر است تا اپراتورها بتوانند با اطلاعات به روز به حوادث احتمالی پاسخ دهند. شبکه هوشمند ترکیبی از شبکه برق با سایر زیرساخت های توانمند است. مدل فیزیکی سایبری شبکه هوشمند از لایه‌های زیر تشکیل شده است که در شکل ۱-٦ نشان داده شده است: (۱) لایه فیزیکی سیستم قدرت، (۲) لایه دستگاه/حسگر (مسئول سنجش و کنترل)، (۳) لایه ارتباطی/سایبری و (٤) لایه مدیریت/برنامه. معماری سیستم فیزیکی سایبری با لایه‌های OSI/شبکه فرق دارد، زیرا این لایه‌ها در دامنه‌های مختلف قرار دارند و برای توصیف ارتباط بین اجزای مختلف استفاده نمی‌شوند.

لایه فیزیکی از زیرساخت قدرت ریزشبکه تشکیل شده است. این شامل اجزایی مانند ژنراتورها، ترانسفورماتورها، بارها و قطع کننده های مدار می شود. مدل های فیزیکی کاملاً تعریف شده ای برای همه این اجزا وجود دارد که به پایش دقیق بر عملکرد سیستم کمک می کند.



شکل ۱-۶ لایه های سیستم فیزیکی-سایبری، [منبع: شرکت جان وایلی و پسران]

لایه‌های حسگر و محرک از دستگاه‌هایی تشکیل شده‌اند که وظیفه سنجش اطلاعات در مورد وضعیت سیستم و اجرای تصمیمات کنترلی را بر عهده دارند. دستگاه های اندازه گیری پارامترهای مختلفی مانند ولتاژ، جریان، فرکانس و وضعیت قطع کننده مدار را حس می کنند. دستگاه‌های کنترلی شامل کنترل کننده‌های ژنراتور، رله‌هایی برای خاموش کردن کلیدهای مدار و سایر دستگاه‌های کنترل محلی هستند.

لایه ارتباطی از زیرساخت ICT تشکیل شده و وظیفه ارائه اطلاعات به لایه های مربوطه را بر عهده دارد. این لایه معمولاً از دستگاه هایی مانند سوئیچ ها، روترها و رسانه ارتباطی تشکیل شده است. بسته به نیاز، ارتباط می تواند سیمی یا بی سیم باشد.

لایه اپلیکیشن نقش محوری در پایش و کنترل دارد، که مسئول عملکرد صحیح ریزشبکه است. این نرم افزار داده ها را از لایه های اندازه گیری از طریق زیرساخت ICT دریافت می کند و در صورت لزوم تصمیم می گیرد که یک اقدام کنترلی اجرا شود. سپس عمل کنترل از طریق زیرساخت ICT به لایه کنترل ارسال می شود. شبکه هوشمند فیزیکی–سایبری با ادغام روزافزون دستگاه های دیجیتال و ارتباطات و محاسبات پیشرفته در شبکه راه رو به جلو برای شبکه برق است. این روش اساساً نحوه عملکرد شبکه برق را تغییر داده و ادامه خواهد داد. برای نیروی کار آینده، مهم است که نه تنها از فیزیک شبکه برق آگاهی داشته باشند، بلکه در زمینه ارتباطات پیشرفته، محاسبات و جنبه های امنیتی شبکه برق نیز آگاهی داشته باشد.

۱-۵ خلاصه فصل

در این فصل، ما اصول اولیه شبکه برق، فیزیک زیربنایی و ساختار عملیاتی آن را مطالعه کردیم. خرابی‌ها و عیوب شبکه برق همراه با مطالعه شناخته شده‌ترین خاموشی‌ها در شبکه توضیح داده شد. این خاموشی ها و اینکه چگونه آنها باعث انتقال به شبکه هوشمند شدند بررسی شد.

۱-٦ تمرینات چند گزینه ای

۱) بالاترین ولتاژ خط انتقال AC در ایالات متحده چقدر است؟

الف: ۳۴۵ کیلو ولت
ب: ۷۶۵ کیلوولت
ج: ۵۰۰ کیلو ولت
د: ۴۵۰ کیلو ولت
ه: ۱۰۰۰ کیلو ولت

۲) کدام عبارت در مورد حفاظت شبکه برق صحیح نیست:

الف: مدار شکن عیب را تشخیص می دهد
ب: رله عیب را تشخیص می دهد
ج: فیوز عیب را تشخیص می دهد
د: مدارشکن خط را باز می کند
ه: رله مدارشکن را راه اندازی می کند

۳) کدام عبارت در مورد شبکه برق موجود صحیح نیست:

الف: میانگین سنی ترانسفورماتور توزیع بیشتر از ۵۰ سال است
ب: درصد نسبتاً بالایی از نیروی کار در ۵ سال آینده بازنشسته می شوند
ج: شبکه برق یکی از کمترین هزینه های تحقیق و توسعه را در مقایسه با سایر زیرساخت ها دارد