



شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد  
Mashad Electric Energy Distribution Co.

## مولدین فتوولتائیک و شبکه های توزیع برق اثرات متقابل، چالش ها و راهکارها

گروه مؤلفین:

دکتر ابوالقاسم زارچی، رضا نژادسلیمانی، هادی علی آبادی

سید علی رضا صبورداو دیان و سعید علیشاهی

---

ویراستار:

محمد علی زرائی

---

صاحب امتیاز:

شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد

پاییز ۱۳۹۴

|                     |   |                                                                                             |
|---------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه             | : | ابوترابی زارچی، حسین، ۱۳۵۷                                                                  |
| عنوان و نام پدیدآور | : | مولدین فتوولتائیک و شبکه های توزیع برق، اثرات متقابل، چالش ها و راهکارها                    |
| گروه مؤلفین         | : | حسین ابوترابی زارچی، رضا نژادسلیمانی، هادی علی آبادی، سیدعلی رضا صبورداودیان و سعید علیشاهی |
| مشخصات نشر          | : | مشهد: تعالی گستر، ۱۳۹۴                                                                      |
| مشخصات ظاهری        | : | ۱۹۲ ص: مصور (بخشی رنگی)، نمودار (رنگی)                                                      |
| شابک                | : | ۹۷۸-۶۰۰-۹۴۱۷۱-۵-۵                                                                           |
| قیمت                | : | ۱۴۰۰۰ ریال                                                                                  |
| وضعیت فهرست نویسی   | : | فیبای مختصر                                                                                 |
| یادداشت             | : | واژه نامه                                                                                   |
| یادداشت             | : | سازمان به صورت زیر نویس                                                                     |
| شناسه افزوده        | : | نورال محمدعلی، ۱۳۳۹ - ویراستار                                                              |
| شناسه افزوده        | : | رکت توزیع نیروی برق مشهد                                                                    |
| شماره کتابشناسی ملی | : | ۱۶۰۰۰۵۷۸                                                                                    |

## مولدین فتوولتائیک و شبکه های توزیع برق

### اثرات متقابل، چالش ها و راهکارها

- صاحب امتیاز: ..... شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد
- گروه مؤلفین: ..... حسین ابوترابی زارچی، رضا نژادسلیمانی، هادی علی آبادی، سیدعلی رضا صبورداودیان و سعید علیشاهی
- ناشر: ..... تعالی گستر
- نوبت چاپ: ..... اول-پاییز ۱۳۹۴
- ویراستار و مدیر اجرایی: ..... محمدعلی نورانی
- تیراژ: ..... ۱۵۰۰ نسخه
- چاپ: ..... زمرد مشهد
- طراح جلد: ..... شیرین رضائی نژاد
- صفحه آرا و ناظر فنی چاپ: ..... محمدجواد نورانی
- قیمت: ..... ۱۴۰۰۰ ریال
- شابک: ..... ۹۷۸-۶۰۰-۹۴۱۷۱-۵-۵

کلیه حقوق قانونی برای صاحب امتیاز محفوظ می باشد (نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است)

## فهرست موضوعات

| عنوان                                                          | شماره صفحه |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| مقدمه.....                                                     | ۱۷         |
| <b>فصل اول : مباحث و لتازی</b>                                 |            |
| ۱-۱- مقدمه.....                                                | ۳۱         |
| ۲-۱- وقوع اضافه ساز.....                                       | ۳۳         |
| ۱-۲-۱- راهکارهای مقابله با اضافه و لتاز.....                   | ۳۸         |
| ۳-۱- وقوع افت و لتاز.....                                      | ۴۵         |
| ۱-۳-۱- راهکارهای مقابله با افت ساز.....                        | ۴۶         |
| ۴-۱- نامتعادلی و لتاز.....                                     | ۵۰         |
| ۱-۴-۱- شرایط وقوع نامتعادلی و لتاز.....                        | ۵۲         |
| ۲-۴-۱- روش های بهبود نامتعادلی و لتاز.....                     | ۵۸         |
| ۵-۱- افزایش بیش از حد عملکرد تجهیزات خودکار موجود در شبکه..... | ۵۹         |
| ۱-۵-۱- تپ چنجر ترانسفورماتور.....                              | ۶۰         |
| ۲-۵-۱- اتویوستر (SVR).....                                     | ۶۲         |
| ۳-۵-۱- بانک خازنی.....                                         | ۶۲         |
| ۴-۵-۱- راهکارهای عمومی.....                                    | ۶۴         |
| <b>فصل دوم : کیفیت توان</b>                                    |            |
| ۱-۲- مقدمه.....                                                | ۷۱         |
| ۲-۲- هارمونیک ها.....                                          | ۷۲         |
| ۱-۲-۲- شرح پدیده.....                                          | ۷۲         |
| ۲-۲-۲- راهکارهای مقابله با هارمونیک.....                       | ۷۵         |

| عنوان                                           | شماره صفحه |
|-------------------------------------------------|------------|
| ۲-۳- تزریق جریان DC.....                        | ۷۶         |
| ۲-۳-۱- شرح پدیده.....                           | ۷۶         |
| ۲-۳-۲- مشاهدات تئوری.....                       | ۸۷         |
| ۲-۳-۳- راهکارهای عملی.....                      | ۸۸         |
| ۲-۳-۴- راهکارهای جلد بر اثر تزریق جریان DC..... | ۹۱         |
| ۲-۴- فلیکرو.....                                | ۹۲         |
| ۲-۴-۱- شرح پدیده.....                           | ۹۲         |
| ۲-۴-۲- راهکارهای مقابله با فلیکرو.....          | ۹۳         |

### فصل سوم: حفاظت - اتصال کوتاه

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ۱-۳- مقدمه.....                                                                | ۱۰۱ |
| ۲-۳- مولدهای فتوولتائیک و افزایش ظرفیت اتصال کوتاه شبکه (PV CC).....           | ۱۰۲ |
| ۲-۳-۱- راهکارهای پیشگیری از افزایش ظرفیت اتصال کوتاه.....                      | ۱۰۲ |
| ۲-۳-۳- تأثیر بر تنظیم رله‌های اضافه جریان و منحنی فیوزها.....                  | ۱۰۴ |
| ۲-۳-۱- حفاظت اضافه جریان برای شبکه‌های شعاعی.....                              | ۱۰۵ |
| ۲-۳-۳- منابع فتوولتائیک متصل به تغییرهای شعاعی و مشکلات حفاظت اضافه جریان..... | ۱۰۶ |
| ۲-۳-۳- کاهش ناحیه دسترس رله‌های امپدانسی.....                                  | ۱۱۱ |
| ۲-۴- تغییر پروفیل ولتاژ و عملکرد رله‌های اضافه ولتاژ.....                      | ۱۱۳ |
| ۲-۵- اثرات متقابل سیستم اتوریکلوژینگ و مولدهای فتوولتائیک.....                 | ۱۱۳ |
| ۲-۵-۱- استفاده از ادوات ترانسفر تریپ.....                                      | ۱۱۷ |
| ۲-۵-۲- اصلاح روش‌های ریکلوژینگ.....                                            | ۱۱۷ |

| عنوان                                                                                           | شماره صفحه |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ۶-۳- اثر جزیره ای شدن.....                                                                      | ۱۱۸        |
| ۶-۳-۱- روشهای مقابله با پدیده جزیره ای شدن.....                                                 | ۱۱۹        |
| ۷-۳- ظرفیت تجهیزات و اضافه بار.....                                                             | ۱۲۵        |
| ۷-۳-۱- اضافه بار ترانسفورماتورها.....                                                           | ۱۲۵        |
| ۷-۳-۲- اضافه بار کلیدها و مدارشکن ها.....                                                       | ۱۲۷        |
| ۷-۳-۳- اضافه بار کابل و فیدر.....                                                               | ۱۲۷        |
| <b>فصل چهارم: سه زمین و حفاظت صاعقه</b>                                                         |            |
| ۴-۱- مقدمه.....                                                                                 | ۱۳۳        |
| ۴-۲- تعریف و لزوم اجرای سیستم زمین.....                                                         | ۱۳۵        |
| ۴-۳- انواع سیستم های توزیع از لحاظ نحوه اجرای سیستم زمین.....                                   | ۱۳۷        |
| ۴-۳-۱- سیستم چهارسیمه با اتصال یگانه یا چندگانه به زمین.....                                    | ۱۳۷        |
| ۴-۳-۲- سیستم سه سیمه با اتصال یگانه به زمین.....                                                | ۱۳۷        |
| ۴-۳-۳- سیستم سه سیمه زمین نشده.....                                                             | ۱۳۸        |
| ۴-۴- چالش های پیش روی انواع سیستم های زمین.....                                                 | ۱۳۹        |
| ۴-۴-۱- چالش های پیش روی سیستم های چهار سیمه با اتصال چندگانه به زمین.....                       | ۱۳۹        |
| ۴-۴-۲- چالش های پیش روی سیستم های چهار سیمه و سه سیمه با اتصال یگانه به زمین.....               | ۱۴۱        |
| ۴-۴-۳- چالش های پیش روی سیستم های سه سیمه زمین نشده.....                                        | ۱۴۲        |
| ۴-۵- راهکارهای مقابله با چالش های مبحث زمین.....                                                | ۱۴۳        |
| ۴-۵-۱- راهکارهای مفید در مورد سیستم های توزیع ۴ سیمه با اتصال چندگانه به زمین.....              | ۱۴۳        |
| ۴-۵-۲- راهکارهای مفید در مورد سیستم های توزیع با اتصال یگانه به زمین و سیستم های زمین نشده..... | ۱۴۴        |

## فهرست موضوعات

| عنوان                                                                                        | شماره صفحه |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ۶-۴- اتصال زمین سیستم های فتوولتائیک.....                                                    | ۱۴۴        |
| ۶-۴-۱- سیستم زمین اینورترهای بدون ترانسفورمر ایزولاسیون.....                                 | ۱۴۸        |
| ۶-۴-۲- دستور العمل نصب سیستم زمین نشده.....                                                  | ۱۵۰        |
| ۶-۳-۱-۳- اتصال زمین.....                                                                     | ۱۵۲        |
| ۶-۴-۷- حفاظت صاعقه و اضافه بارها.....                                                        | ۱۵۴        |
| ۶-۴-۱-۷- اصابت غیر مستقیم صاعقه.....                                                         | ۱۵۴        |
| ۶-۴-۲- ولتاژ القا شده ناشی از صاعقه.....                                                     | ۱۵۶        |
| ۶-۴-۳- اضافه ولتاژهای ناشی از شبکه.....                                                      | ۱۵۷        |
| ۶-۴-۴- نتایج آزمایش های تجربی.....                                                           | ۱۵۷        |
| ۶-۴-۵- حفاظت اضافه ولتاژ ناشی از اصابت غیر مستقیم.....                                       | ۱۶۰        |
| <b>فصل پنجم: سازگاری الکترومغناطیسی</b>                                                      |            |
| ۱-۵- مقدمه.....                                                                              | ۱۶۵        |
| ۲-۵- انواع تداخلات الکترومغناطیسی از لحاظ مکانیزم کوپلینگ.....                               | ۱۶۷        |
| ۳-۵- تداخل در اثر کوپلینگ خازنی.....                                                         | ۱۶۹        |
| ۴-۵- تداخل در اثر ترکیب کوپلینگ رسانا، خازنی و اندوکتیو.....                                 | ۱۶۹        |
| ۵-۵- تداخل در اثر کوپلینگ تشعشی ناشی از ضربات صاعقه.....                                     | ۱۷۰        |
| ۶-۵- بررسی اجزای یک سیستم فتوولتائیک متصل به زمین و انواع تداخلات الکترومغناطیسی مربوطه..... | ۱۷۰        |
| ۶-۵-۱- بخش DC مولد فتوولتائیک.....                                                           | ۱۷۱        |
| ۶-۵-۲- اینورتر.....                                                                          | ۱۷۲        |

## فهرست موضوعات

| شماره صفحه | عنوان                                                                                    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱۷۲        | ۷-۵- تست سازگاری الکترومغناطیسی تجهیزات.....                                             |
| ۱۷۳        | ۷-۵-۱- آزمایش های انتشار امواج.....                                                      |
| ۱۷۸        | ۷-۵-۲- جمع بندی راهکارها به منظور بهبود سازگاری الکترومغناطیسی سیستم های فتوولتائیک..... |
| ۱۸۳        | ضمیمه الف: چک لیست سیستم های خورشیدی برای اتصال به شبکه سراسری برق.....                  |
| ۱۸۸        | ضمیمه ب: فهرست استاندارد برای جمع و ضبط به فتوولتائیک.....                               |



### انرژی پاک از منبع پاک

... چه امروز، چه فردا، پیش خردون آنچنان تقدیر خواهد نمود که درخت تلاش و صبوری ملت ایران به بار بنشیند و راه رونق و توسعه کشور بیش از پیش هموار شود.

این موضوعی است که هیچ تردیدی در آن وجود ندارد. این را هم بدانیم که بستر رونق و توسعه هر کشوری برقراری پایدار و اقتصادی انرژی الکتریک است. است که این مهم بایستی متناسب با پیشرفت علم و تکنولوژی، توسط نخبگان صنعت برق و دانشگاه بستر سازی شود.

در شرایط فعلی کشور و علی رغم تحریم های ناجوانمردانه نخبه های صنعت و دانشگاه توانسته اند درخت علم و دانش کشور را - هر چند با مرارت و سختی بسیار - اندامان بارور نموده و به روز نگه دارند که دشمنان این ملت نیز به آن اعتراف می کنند.

یکی از دانش هایی که امروز بیش از هر زمان دیگر برای استقرار سیستم تامین انرژی ایدار الکتریکی بدان نیاز داریم آشنایی با دانش و فن آوری استفاده از منبع خدادادی خورشید است.

استفاده از این منبع خدادادی علاوه بر ابعاد اقتصادی - امنیتی، ابعاد مثبت زیست محیطی فراوانی نیز دارد. محیط زیستی که با زیاده خواهی انبای بشر به ویژه در قرن اخیر، آسیب فراوانی دیده و نظام سلامت بشریت را هدف گرفته است.

اما استفاده از این فن آوری کارآمد در جهت تولید انرژی پاک از یک منبع پاک، در صورتی که با تدابیر علمی و فنی و ایمنی همراه نباشد، ممکن است ضایعاتی را به خصوص در شبکه های توزیع برق کشور پدید آورد.



خوشبختانه با توجه به سیاست های شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد در جهت استقبال از انتشار مطالعات علمی و کاربردی، گروه مولفین کتاب حاضر با محوریت جناب آقای دکتر حسین ابوترابی زارچی و مشارکت آقایان مهندس رضانژاد سلیمانی، مهندس هادی علی آبادی، مهندس سیدعلیرضا صبور داودیان، مهندس سعیدعلیشاهی و همچنین همکاری صمیمانه آقایان مهندسین حمیدرضا صادقی شقاقی، روزبه خانجانی، شهرام وصفی، محسن ابوترابی زارچی، محسن بشیر، محمدطیسی و سیدمحمدحسین پور (از کارشناسان خبره این شرکت و دانشگاه) به این موضوع پرداخته و زوایای مختلف اثرات متقابل مولدین فتوولتائیک و شبکه های توزیع برق به همراه چالش ها و راهکارهای عملی مربوطه را به صورت علمی و موşkافانه بررسی نموده و ارائه دادند.

اینجانب ضمن تقدیر و تشکر از گروه مولفین این کتاب وزین، دانشجویان و کارشناسان مرتبط با کار پنل های خورشیدی را به مطالعه آن توصیه می کنم. همچنین تلاش های جناب آقای نورائی در جهت ویراستاری مطالب و هدایت امور چاپی این مکتوب را می ستایم.

امید است زحمات گرانقدر این خدمتگزاران به عرصه صنعت برق کشور عزیزمان مقبول درگاه ذات احدیت قرار گیرد.

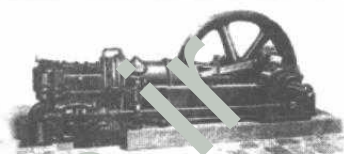
علی سعیدی

مدیرعامل

## مروری بر تاریخچه شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد



بیش از یک صد سال از زمانی که اولین چراغ برق در شهر مشهد و آن هم در حرم مطهر حضرت رضا (ع) روشن شد، می گذرد. در آن زمان برای اولین بار در ایران از انرژی برق به صورت عمومی استفاده شد.



قدیمی ترین مولد برق در حرم امام رضا (ع) به قدرت ۱۲ اسب بخار مربوط به سال ۱۳۰۲ (ه. ش)

در سال ۱۳۱۶ شرکت عمومی برق مشهد تأسیس و تا سال ۱۳۴۳ که شرکت های برق منطقه ای راه اندازی شدند، مشغول فعالیت بود و پس از آن در قالب شرکت برق منطقه ای خراسان عهده دار ارائه خدمات به مردم استان خراسان گردید.



آموزش نیروهای شبکه



اولین کیوسک ۲۰ کیلو ولت منصوبه در خیابان برق مشهد



گروه نوسازی در حال زدن سیم شبکه

در سال ۱۳۷۱ با اجرای طرح خصوصی سازی شرکت های تابعه وزارت نیرو، بخش اجرایی توزیع از ساختار سازمانی شرکت برق منطقه ای خراسان منفک گردیده و به عنوان یک شرکت تابعه، فعالیت های خدمات رسانی خود را با نام «شرکت توزیع نیروی برق خراسان» به صورت جدا آغاز نمود.

در سال ۱۳۷۳ با تغییر مجدد ساختار برق منطقه ای خراسان و تشکیل شرکت های جدید تابعه، مدیریت برق مشهد نیز از ساختار شرکت نوپای توزیع نیروی برق استان خراسان منفک شده و اجرای وظایف برق رسانی به بیش از ۵۰۰ هزار مشترک (در آن مقطع زمانی) در محدوده شهرستان های مشهد، چناران، فریمان، سرخس و کلات را تحت عنوان شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد بر عهده گرفت.

پس از تحولات به وجود آمده در نقشه های جغرافیایی و تقسیمات جدید کشوری، در نیمه دوم سال ۱۳۸۲ ادارات برق شهرستان های چناران، فریمان و سرخس و همچنین در اواسط سال ۱۳۸۶ شهرستان کلات از ذیل ساختار سازمانی شرکت توزیع نیروی برق مشهد، به زیر مجموعه شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی منتقل شدند.



سال ۱۳۴۶ مهندس حواد شهر سبانی در میاب کارکنان برق منطقه ای خراسان

سرانجام در سال ۱۳۸۶ باتصویب قانون استقلال شرکت های توزیع نیروی برق در مجلس شورای اسلامی و در راستای پیاده سازی قانون مذکور، از ابتدای نیمه دوم همان سال، شرکت توزیع نیروی برق مشهد از جرگه شرکت های تابعه برق منطقه ای خراسان خارج گردیده و، عنوان شرکتی جدا فصل جدیدی از فعالیت های خود، تحت نظارت مستقیم شرکت توانیر آغاز نمود.

شایان ذکر است این شرکت گذشت بالغ بر ۱۸ سال از خدمات رسانی به زائرین و مجاورین بارگاه ملکوتی حضرت رضا (ع) روزه رور شاه کسبش سطح فعالیت و رشد چشمگیر توانمندی های کارشناسی خود در عرصه صنعت برق کشور بوده و، در حصرش در چند سال اخیر، همواره در ارزیابی های سالانه عملکرد شرکت های توزیع، به عنوان یکی از شرکت های برتر شناخته شده است. به ویژه آن که کلان شهر مشهد مقدس نیز به دلیل وجود مضجع شریف رضوی، از اهمیت، سزایی در جهان اسلام و در نزد شیعیان برخوردار بوده و همه ساله پذیرای میلیون ها مسافر می باشد که به نوبه خود، نشان دهنده حساسیت بالای وظایف محوله و ماموریت های سازمانی شرکت توزیع نیروی برق مشهد است.

هم اکنون و در انتهای سال ۹۳، این شرکت به بیش از یک میلیون سیصد هزار (۱/۴۰۰/۰۰۰) مشترک در کلان شهر مشهد مقدس خدمات رسانی نموده و با عبور از روش های نوین مانند به کارگیری سیستماتیک تعمیرات پیشگیرانه خطوط فشار متوسط به صورت خط گرم فرمان از نزدیک، راه اندازی بزرگترین دیسپاچینگ شبکه های توزیع برق کشور و اتوماسیون، خرابی ۶۰ دستگاه کلید فشار متوسط، استفاده وسیع از کابل های خودنگهدار فشار ضعیف، به کارگیری سیم های روکش دار فشار متوسط در شبکه ها و حرکت به سمت هوشمند سازی شبکه ها و لوازم اندازه گیری در جهت ارتقای جایگاه شرکتی که اسلاف خدمت گزار به خوبی به ما تحویل دادند، به جایگاه برتر در سطح کشورهای منطقه در سال ۱۴۰۵ هـ. ش گام های بلندی برداشته است و مطمئن هستیم که تلاش و بلوغ سازمانی همکاران مان در سایه توجهات خاصه حضرت رضا (ع) ما را به این مهم خواهد رساند. (ان شاء...)

## مقدمه

طی سالیان اخیر مدیریت و مالکیت صنعت برق کشور دستخوش تغییرات اساسی شده و هدف اصلی این تغییرات، افزایش بهره‌وری و نیز تشویق سرمایه‌گذاران در این صنعت بوده است. تمایل به ایجاد فضای رقابتی مناسب، موجب تفکک بخش انرژی مختلف آن از جمله تولید، انتقال و توزیع شده است. این تحولات از یک سو عوامل مهمی همچون ارتقای امنیت انرژی، کیفیت توان، ملاحظات زیست محیطی، مشکلات احداث خطوط انتقال جدید و پیشرفت فن‌آوری‌های حادث، واحدهای تولید پراکنده مقیاس کوچک و با صرفه از سوی دیگر، باعث توجه جدی به منابع تولید پراکنده گردیده است. از جمله این منابع، می‌توان به توربین‌های بادی، پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها، فتوولتائیک، توربین‌هایابی کوچک، و زیست توده اشاره کرد.

سالانه حجم وسیعی از گازهای گلخانه‌ای و آلاینده زیست، ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در جهان منتشر می‌شود که این مسأله زندگی انسان و سایر موجودات جهان را با بحران‌های متعدد زیستی و سلامتی مواجه ساخته است. علاوه بر این، منابع انرژی فسیلی ده‌ها میلیون سال قبل در دل زمین ایجاد شده‌اند، با استخراج و مصرف بی‌رویه، روزی به پایان می‌رسند و حتی برخی بررسی‌ها نشان می‌دهد که پیک تولید برخی از منابع انرژی از جمله ذغال سنگ و نفت خام سپری شده و ممکن است با تداوم روند فعلی مصرف، طی دهه‌های آتی انسان قادر به استفاده از این منابع نباشد. بر این اساس، پذیرش و آلاینده‌گری بالای منابع انرژی فسیلی، استفاده از منابع تجدیدپذیر به خصوص انرژی خورشیدی، آب‌انبار، بایاب ناپذیر ساخته است و استفاده از منابع تجدیدپذیر و نو، بخشی از راه حل جهانی برای مبارزه با بحران‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است.

علاوه بر نگرانی‌های مرتبط با مسائل زیست محیطی و پایان‌پذیر بودن منابع انرژی فسیلی، اقتصادی‌تر شدن و کاهش هزینه نصب سیستم‌های فتوولتائیک طی سال‌های اخیر نیز عامل بسیار مهمی در توسعه آن‌ها به عنوان راهبردی برای تأمین انرژی در بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا به شمار می‌رود.



برای تشریح هرچه بهتر این موضوع، توجه خوانندگان کتاب را به آمار و نکات ذیل جلب می‌کنیم:

بازار سیستم‌های فتوولتائیک در سال‌های اخیر به سرعت رو به رشد بوده است، به گونه‌ای که شاخص نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR)<sup>۱</sup> آن در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ برابر با ۴۴ درصد بوده است. در سال ۲۰۰۴ کشورهای چین و تایوان وارد بازار تولید انبوه اجزای سیستم فتوولتائیک شدند و صنعتی قدرتمند را با نرخ رشد بسیار بالا ایجاد کردند. در پایان سال ۲۰۱۳ سهم این دو کشور از بازار سیستم‌های فتوولتائیک به حدود ۷۰ درصد<sup>۲</sup> مجموع میزان آن در کل دنیا رسید. در سال ۲۰۱۲ کشورهای اروپایی مجموعاً ۶۵ درصد از کل توان نصب شده سیستم‌های فتوولتائیک دنیا را به خود اختصاص داده بودند که این مقدار در سال ۲۰۱۳ به ۵۸ درصد کاهش یافت. در مقابل میزان توان نصب شده در کشورهای چین و تایوان که در سال ۲۰۱۲ برابر ۸ درصد کل توان سیستم‌های نصب شده در دنیا بود، در سال ۲۰۱۳ به عدد ۱۳ درصد رسید.

تا انتهای سال ۲۰۱۳ در سه و نیم میلیون سیستم فتوولتائیک با مجموع توان ۳۵ هزار و ۷۰۰ مگاوات نصب شده که حدود ۲۷ درصد از کل توان نصب شده دنیا را به خود اختصاص داده است. تنها در سال ۲۰۱۳، حجم سیستم‌های فتوولتائیک جدیدی که در این کشور نصب شده بالغ بر ۳ هزار مگاوات بوده است. قابل توجه این که در سال ۲۰۱۳، نزدیک به ۵/۳ درصد از کل توان الکتریکی مصرفی در کشور آلمان (معادل ۲۹/۷ تراوات ساعت) از طریق سیستم‌های فتوولتائیک تأمین گردید، که در پی انجام این کار، از تولید و انتشار بیش از ۲۰ میلیون تن گاز دی‌اکسید کربن در این کشور جلوگیری شده است.

پنل‌های فتوولتائیک متشکل از تعداد مشخصی سلول فتوولتائیک<sup>۱</sup> است. در سال ۲۰۱۳، تکنولوژی ساخت ۹۰ درصد از پنل‌های فتوولتائیک مبتنی بر ویفر سیلیکون<sup>۲</sup> بوده و در حال حاضر ۵۰ درصد از پنل‌های فتوولتائیک تولید شده در دنیا دارای تکنولوژی مولتی کریستالی هستند.

در طی ۱۰ سال اخیر، میانگین بازدهی ماژول‌های مبتنی بر ویفر سیلیکون، از حدود ۱۲ درصد به ۱۶ درصد افزایش داشته و در همین بازه زمانی، بازدهی ماژول‌های لایه نازک نیز با حدود ۴ درصد افزایش، از ۹ درصد به ۱۳ درصد ارتقاء یافته است. بهترین بازدهی به دست آمده برای ماژول‌های سیلیکونی در محیط آزمایشگاهی، مربوط به ماژول‌های مونوکریستالی با بازدهی حدود ۲۳ درصد است. دستیابی به چنین بازدهی در محیط آزمایشگاهی، می‌تواند نویدبخش افزایش هرچه بیشتر بازدهی پنل‌های فتوولتائیک تجاری در سال‌های آتی باشد.

1 - compound annual growth rate

2 - Silicon Wafer

بر اساس نتایج به دست آمده، دوره بازگشت انرژی یک سیستم فتوولتائیک نصب شده در اروپای جنوبی با استفاده از ماژول‌های سیلیکونی مولتی کریستالی، تقریباً برابر یک سال است. این بدان معناست که با در نظر گرفتن طول عمر ۲۰ ساله برای این سیستم‌ها، هر سیستم می‌تواند ۲۰ برابر انرژی مصرف شده برای تولید سیستم را در طول عمر خود فراهم نماید. با این حال، واضح است که دوره بازگشت انرژی سیستم‌های فتوولتائیک به منطقه جغرافیایی نصب سیستم نیز وابسته است، کما اینکه این دوره برای سیستم‌های فتوولتائیک نصب شده در اروپای شمالی حدود ۲/۵ سال برآورد می‌گردد.

بازدهی اینورهاها، فتوولتائیک ساخت برندهای معتبر دنیا ۹۸ درصد و بیشتر از آن است. سهم بازار اینورترهای رشته‌ای (غیر متمرکز) در حدود ۵۰ درصد است. این اینورترها عمدتاً در کاربردهای خانگی یا تجاری کوچک و متوسط استفاده می‌شوند. در مقابل، سهم بازار اینورترهای مرکزی که بیشتر در سیستم‌های تجاری بزرگ و سیستم‌های در مقیاس متوسط به کار برد دارند حدود ۴۸ درصد است. در حال حاضر سهم اندکی (نزدیک به ۱/۵ درصد) از بازار اینورترها متعلق به میکرو اینورترهاست. میانگین قیمت خرده‌فروشی اینورترهای فتوولتائیک در کشور آلمان برابر ۱۴ یورو - نسبت به ازای هر وات است. البته اینورترهای مرکزی عمدتاً قیمت پایین‌تری نسبت به اینورترهای رشته‌ای دارند.

بر اساس نظر کارشناسان، روند بهبود طراحی اینورترهای فتوولتائیک به گونه‌ای است که در سال‌های آتی شاهد ظهور اینورترهایی خواهیم بود که می‌توانند به پایداری و بهبود کیفیت توان شبکه کمک کنند، میزان مصرف داخلی آن‌ها کاهش می‌یابد، واحدهای ذخیره انرژی در داخل اینورترها فراهم می‌شود و از تکنولوژی‌های نوین ساخت ادوات نیمه‌هادی به منظور بالاتر بردن بازدهی آن‌ها استفاده خواهد شد.

در سال ۱۹۹۰ در کشور آلمان هزینه نصب یک سیستم فتوولتائیک ۱۰ کیلوواتی، حدود ۱۴ هزار یورو به ازای هر کیلووات بود. این عدد در انتهای سال ۲۰۱۳ به حدود ۱۳۵۰ یورو به ازای هر کیلووات رسید. به عبارت دیگر هزینه نصب این سیستم‌ها در یک بازه ۲۳ ساله حدود ۹۰ درصد کاهش پیدا کرده است. ضمناً مشاهدات تجربی طی ۳۰ سال اخیر نشان داده که هزینه تولید ماژول‌های فتوولتائیک به ازای دو برابر شدن میزان تولید آنها، ۲۰ درصد کاهش یافته است.

همان طور که در آمارهای فوق الذکر مشخص است، طی سالیان اخیر بسیاری از کشورهای توسعه یافته و نیز در حال توسعه، ضرورت نصب سیستم های فتوولتائیک را به عنوان راهکاری مطمئن برای تأمین بخشی از انرژی مورد نیاز خود درک کرده اند. این در حالی است که میانگین سالیانه تابش خورشید در کشور آلمان کمتر از ۶۰ درصد مقدار آن در کشور ایران است. بنابراین با عنایت به حجم گسترده نفوذ سیستم های فتوولتائیک در کشور آلمان، ضرورت توسعه این سیستم در کشور ما بیش از پیش روشن می گردد.

کشور ایران تنها با تولید ۵۵۶,۸۶۶,۴۴۲ تن دی اکسید کربن در سال ۱۳۹۱ (۷۳۲۳,۵ کیلوگرم به ازای هر ایرانی)، یکم ریزرگترین منتشرکنندگان گازهای گلخانه ای و آلاینده در جهان محسوب می شود.<sup>۱</sup> انتشار این آلاینده ها، اثرات<sup>۱-۲</sup> اجتماعی، محیط زیستی قابل توجهی را در پی دارد که بسیاری از این اثرات قابل اندازه گیری نیست.

بر اساس بررسی های انجام گرفته در ایران، در سال ۱۳۹۱ هزینه های اجتماعی بخش های مصرف کننده انرژی، ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای و آلاینده، در مجموع بالغ بر ۱۰۲,۶۵۰ میلیارد ریال (به قیمت ثابت سال ۱۳۸۱) بوده است که این رقم معادل ۱۹,۳۲ درصد از تولید ناخالص داخلی ایران در آن سال می باشد (تولید ناخالص داخلی کشور در سال ۱۳۹۱ بالغ بر ۵۲۲,۹۵۷ میلیارد ریال به قیمت ثابت سال ۱۳۸۱ بوده است).<sup>۲</sup> این رقم به اندازه ای نگران کننده است که به تنهایی دلیل محکمی برای اصلاح الگوی مصرف سوخت و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، فراهم می کند.

مصرف انرژی در کشور ما نیز طی دهه های گذشته سیر صعودی داشته و به موازات رشد اقتصادی و افزایش جمعیت، همواره افزایش یافته است به طوری که طی سال های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۰ مصرف نهایی انرژی در کشور با متوسط رشد سالانه ۵,۰۸ درصد از ۳۷۴ میلیون بشکه معادل نفت<sup>۳</sup> در سال ۷۰ به ۱,۰۵۹ میلیون بشکه معادل نفت خام در سال ۹۱ افزایش یافته است.

در این بین، دو مسأله مهم در ارتباط با الگوی مصرف انرژی در کشور وجود دارد؛ مسأله اول نیاز ارزی کشور به صادرات سوخت های فسیلی است که سالانه بخش قابل توجهی از بودجه جاری و عمرانی کشور از طریق منابع ارزی ناشی از صادرات نفت و گاز و مشتقات آن تأمین می شود. روندهای فعلی مصرف انرژی در داخل، ممکن است ظرفیت صادرات انرژی در آینده را محدود کند که این مسأله در میان مدت صدمه بزرگی به اقتصاد کشور وارد می کند.

۱ - ترازنامه انرژی ۱۳۹۱، ص ۲۵۳

۲ - ترازنامه انرژی ۱۳۹۱، ص ۲۵۳



از طرف دیگر با توجه به محدودیت های موجود در تولید انرژی های فسیلی، ممکن است تکافوی تأمین نیاز داخل را ننماید که در این صورت ایران به وارد کننده انرژی تبدیل می شود! توجه به دو مسأله فوق دلیل دیگری برای اصلاح الگوی مصرف سوخت و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و تنوع بخشی به سبد عرضه انرژی در کشور می باشد.

در بین حامل های انرژی تجدید پذیر، انرژی خورشیدی از جایگاه قابل توجهی برخوردار است و با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران در کمربند بیابانی و کویری جهان، پتانسیل بالایی برای استفاده از این انرژی در ایران وجود دارد. ایران کشور است که به گفته متخصصان با داشتن ۳۰۰ روز آفتابی در بیش از دو سوم مساحت آن و متوسط تابش ۴ الی ۵٫۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز، به عنوان یکی از کشورهای با پتانسیل بالا در زمینه انرژی خورشیدی مطرح می باشد.

با توجه به آمار مطرح شده پیرامون ارزش ها و قیمت تجهیزات سیستم های خورشیدی و نیز رشد چشمگیر بازار این سیستم ها در سطح دنیا، آمده از آن طی سال های اخیر در جهان از روند رشد بسیار بالایی برخوردار بوده است، به طوری که رشد مصرف سه ساله این انرژی در جهان بیش از سایر حامل های انرژی می باشد و تا پایان سال ۲۰۱۳ میلادی بیش از ۶۰۰ گیگاوات ظرفیت نصب شده انرژی خورشیدی بوده است. البته طی سال های اخیر با حمایت های انجام گرفته از سوی نهادهای دولتی و با تصویب ماده ۶۹ قانون بودجه سال ۱۳۹۲ و نیز بند «ز» تبصره ۹ قانون بودجه سال ۱۳۹۳، نفوذ سیستم های فتوولتائیک در شبکه های توزیع برق ایران نیز رو به گسترش است.

به طور کلی نصب مولدین پراکنده و از جمله مولدین فتوولتائیک، نیازمند راهبردهای مشخصه های گوناگون شبکه توزیع مثل ولتاژ، جهت شارش توان، هارمونیک و دیگر پارامترها می باشد. با عنایت به گرایش و نیاز روزافزون به گسترش استفاده از این فن آوری در شبکه های توزیع، این سوال جدی مطرح می گردد که آخرین مطالعات و تجربیات در زمینه حضور بهینه این سیستم ها در شبکه های توزیع ناظر به چه مواردی بوده و اساساً بکارگیری این فن آوری با بروز چه چالش ها و خلق چه فرصت هایی در شبکه توزیع برق توأم است.

از آنجا که مدت چندان زیادی از حضور تکنولوژی سیستم های فتوولتائیک در داخل کشور نمی گذرد، مطالعه و بررسی های چندان دقیقی در این خصوص صورت نگرفته است. اما در دیگر نقاط جهان، در کشورهایی نظیر آمریکا، اتحادیه اروپا و به ویژه آلمان و ژاپن، مطالعات گسترده ای در این زمینه ها انجام پذیرفته

و تجربیات وسیعی در این زمینه گزارش شده که از آن جمله می توان به آژانس بین المللی انرژی (IEA)، آزمایشگاه ملی تحقیقات انرژی های تجدیدپذیر (NREL)، موسسه تحقیقاتی SANDIA و سازمان های تدوین کننده استانداردهای بین المللی برق مانند IEEE، IEC و غیره اشاره نمود. در انتهای کتاب، فهرست ۹۱ استاندارد و مراجع معتبر در زمینه فتوولتائیک آورده شده است.

هدف از انتشار این کتاب، بررسی تأثیرات متقابل بین مولدین فتوولتائیک و شبکه توزیع برق و نیز تبیین الزامات و ملاحظات فنی، به منظور حفظ شرایط استاندارد شبکه برای گسترش این سیستم های تولید انرژی در شبکه توزیع است. با دستیابی به این ملاحظات و الزامات می توان رشد این مولدین را به صورت صحیح و با حفظ الزامات فنی فراهم نمود.

به عبارت دیگر، با استفاده از این کتاب، می توان به گونه ای شرایط را مهیا نمود که نفوذ سیستم های فتوولتائیک در شبکه توزیع با حداقل عوارض به ارائه ای پایدار در شبکه، کیفیت توان، افزایش ظرفیت و در نهایت توسعه پایدار منجر گردد. در همین راستا، در انتهای این کتاب، به منظور ارزیابی صحت نصب و عملکرد تجهیزات سیستم های فتوولتائیک ارائه شده که برگرفته از ملاحظات فنی، شرح در فصول مختلف کتاب است.

عناوینی که در فصل های بعدی کتاب ملاحظه فرمایید نمود، عمدتاً ناظر بر اثرات متقابل نامطلوب سیستم های فتوولتائیک و شبکه های توزیع برق بر روی یکدیگر است و یکی از مهمترین اهداف این کتاب نیز بررسی این اثرات و ارائه راهکارهایی در جهت رفع یا کاهش آن و به طرف ساختن نگرانی های احتمالی از نصب سیستم های فتوولتائیک در شبکه توزیع است. از سوی دیگر، در ادامه این فصل مختصراً راجع به تأثیرات مثبت نصب این گونه سیستم ها بر شبکه توزیع توضیحاتی ارائه می گردد. در ادامه، طی فصول مختلف کتاب نیز به جنبه هایی از تأثیرات مطلوب نفوذ سیستم های فتوولتائیک در شبکه های توزیع اشاره شده است.

#### ۱- کاهش تلفات در بخش انتقال و توزیع

در بسیاری از شبکه های قدرت، نیروگاه های بزرگ، کیلومترها از نقاط مصرف فاصله دارند. در نتیجه عبور توان از شبکه انتقال و سپس توزیع شدن آن در محل مصرف، با بروز تلفات همراه است. قاعدتاً این تلفات متناسب با فاصله بین محل تولید و مصرف است و بنابراین در مناطق مختلف، تلفات شبکه مقادیر متفاوتی دارد. با توجه به آنکه غالباً در شبکه های توزیع، ولتاژ پایین بوده و به تناسب آن میزان جریان زیاد است، بخش عمده تلفات سیستم قدرت مربوط به این شبکه ها می شود. به طوری که حدود ۵ تا ۱۳ درصد از کل توان تولید شده

در شبکه‌های قدرت، توسط خطوط شبکه‌های توزیع تلف می‌شود. در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای کاهش این تلفات انجام گرفته است که مهمترین آن‌ها نصب مولدین پراکنده به صورت گسترده در شبکه‌های توزیع برق می‌باشد.

در این میان، مولدین پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، به خصوص مولدین فتوولتائیک، به طور گسترده‌تری مورد توجه قرار گرفته‌اند، چرا که امکان نصب و بهره‌برداری از این نوع مولدین تقریباً در هر جاکه تابش مناسب آفتاب وجود داشته باشد، به سهولت امکان‌پذیر است. بنابراین تولید توان الکتریکی در محل مصرف با استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک توزیع شده می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش تلفات انرژی شبکه‌های برق ایفا نماید.

## ۲- افزایش قابلیت اطمینان در تولید توان الکتریکی

قابلیت اطمینان در تأمین توان الکتریکی یکی از شاخصه‌های توسعه‌یافتگی صنعت برق هر کشور و یکی از انتظارات بدیهی مشترکین برق است. هم تولید کنندگان و هم مصرف کنندگان نهایی در شبکه برق از منافع افزایش قابلیت اطمینان شبکه بهره‌مند می‌گردند. با افزایش قابلیت اطمینان تأمین توان الکتریکی (یا به عبارت دیگر کاهش دفعات و مدت زمان بروز خاموشی در شبکه) هم توان از بروز زیان‌های قابل توجه، هم در سمت مشترکین (به خصوص مشترکینی که دارای بارهای حساس هستند) و هم در سمت تولید کنندگان جلوگیری به عمل آورد.

تأمین توان الکتریکی از طریق شبکه اصلی برق ممکن است در اثر رخ دادن یک حادثه یا بروز بلایای طبیعی دچار اختلال گردد. به طور مثال در کشور ژاپن (که به طور دائم در معرض بروز بلایای طبیعی است) نصب سیستم‌های فتوولتائیک با قابلیت تأمین توان الکتریکی به هنگام از دست رفتن شبکه اصلی برق یا در زمان بروز شرایط اضطراری در شبکه، تا حد بسیار زیادی به افزایش قابلیت اطمینان تأمین توان الکتریکی مشترکین منجر شده است.

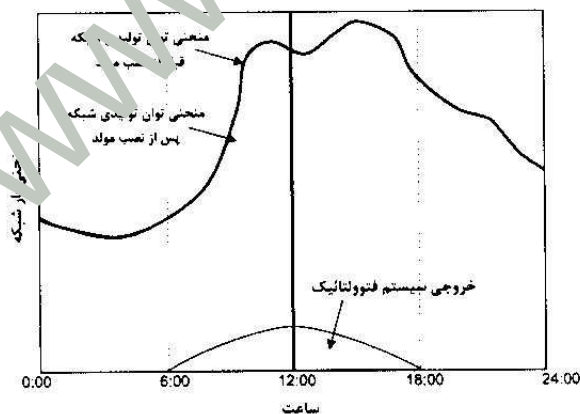
در این سیستم‌ها، مصرف کنندگان قادر هستند که وضعیت سیستم فتوولتائیک خود را در زمان بروز رخدادی در شبکه، از حالت عادی به وضعیت جدا از شبکه تغییر دهند و از یک پریز برق تعبیه شده بر روی اینورتر به عنوان برق اضطراری استفاده نمایند. البته از آنجا که خروجی سیستم‌های فتوولتائیک غیر پیوسته و کاملاً وابسته به شرایط آب و هوایی است، استفاده از آن‌ها در حالت جدا از شبکه مستلزم استفاده از تجهیزات ذخیره‌سازی

انرژی، نظیر بانک های باتری با ظرفیت مناسب به منظور جلوگیری از آسیب دیدگی تجهیزات حساس مشترکین است که این امر قاعداً منجر به افزایش هزینه بهره برداری از سیستم می گردد.

### ۳- تأمین پیک توان مصرفی

در اغلب شبکه های برق دنیا، منحنی مصرف توان الکتریکی دارای دو پیک روزانه (در ساعات روشنایی روز و عمدتاً نزدیک به ظهر) و شبانه است<sup>۱</sup>. از آنجا که سیستم های فتوولتائیک در زمان روشنایی روز اقدام به تولید توان الکتریکی می نمایند، مطابق شکل (م-۱) می توانند نقش بسیار تأثیرگذاری در تأمین پیک بار روزانه شبکه داشته باشند. این امر موجب به خصوص در کشورهایی که آب و هوای نسبتاً گرم تری دارند محسوس تر است، چرا که این سیستم ها می توانند افزایش بار را در اوج راه اندازی سیستم های سرمایشی در طول روز را جبران نمایند.

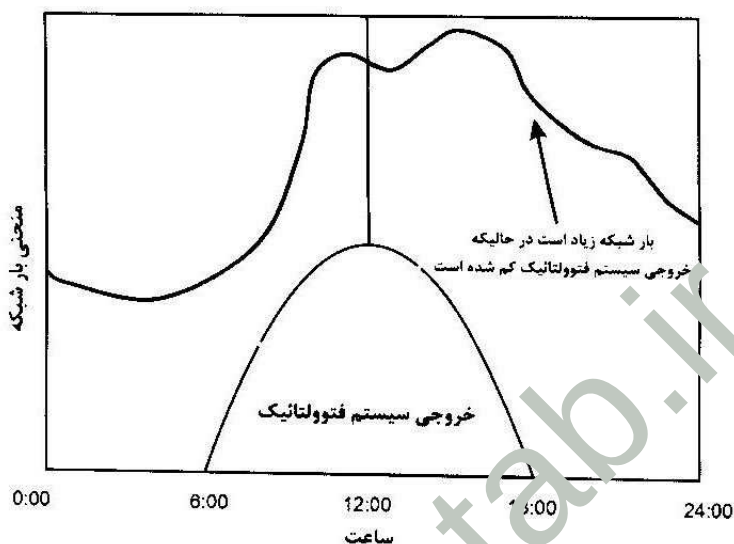
علی رغم مزیت فوق الذکر برای نصب سیستم های فتوولتائیک در شبکه، چالش هایی نیز در این حوزه وجود دارد. از جمله اینکه در بسیاری از کشورها در ساعات بعد از ظهر، کماکان شبکه در وضعیت پرباری یا نهایتاً میان باری قرار دارد، در حالی که مطابق شکل (م-۲) در این ساعات توان تولیدی سیستم های فتوولتائیک رو به کاهش می گذارد. از سوی دیگر همانطور که در نمودار خروجی سیستم های فتوولتائیک غیر پیوسته بوده و شدیداً وابسته به میزان تابش خورشید است. بنابراین - در دوره نیاز است که برای پیک بار روزانه ای که قرار است با نصب سیستم فتوولتائیک جبران سازی گردد، واحدهای نیروگاهی رزرو نیز به عنوان پشتیبان در نظر گرفته شود تا قابلیت اطمینان شبکه کاهش نیابد.



شکل م-۱: منحنی نمونه بار شبکه و توان تولیدی مولد فتوولتائیک

۱- البته این موضوع مستقیماً وابسته به شرایط خاص هر منطقه است و مطلب مذکور، ناظر بر شبکه های عادی موجود در سطح میاست.





شکل م-۳: مساحتی نمونه بار شبکه و توان تولیدی مولد فتوولتائیک در ساعات مختلف روز. بار شبکه کم است در ساعات صبح و شب و زیاد است در ساعات ظهر.

استفاده ترکیبی از سیستم‌های مقیاس کوچک ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و سیستم‌های فتوولتائیک، می‌تواند مزیت آن‌ها را در تأمین بخشی از پیک بار شبکه بسیار به رد دهد. در این صورت با ذخیره‌سازی توان الکتریکی در ساعات‌هایی که خروجی مولدین فتوولتائیک در ساعات صبح و شب کم است و استفاده از این انرژی ذخیره‌شده در زمان نیاز، می‌تواند سهم شبکه برق را در تأمین پیک بار شبکه کاهش دهد.

عدم تعادل بین تولید و مصرف توان الکتریکی در شبکه قدرت منجر به بروز نوسان در فرکانس شبکه و آسیب دیدگی تجهیزات مصرف‌کنندگان می‌شود. این در حالی است که میزان مصرف (بار) شبکه دائماً در حال تغییر است. به منظور پاسخگویی هرچه مناسب‌تر به این تغییرات، بهره‌برداران شبکه عمدتاً نیروگاه‌ها را دسته‌بندی کرده و هر دسته را به طور مستقل مورد بهره‌برداری قرار می‌دهند. به عنوان مثال این دسته‌بندی مطابق شکل (م-۳) می‌تواند شامل بار پایه شبکه به منظور تأمین آن به طور پیوسته در تمام ساعات شبانه‌روز، میان‌باری برای پوشش دهی تغییرات بار در طول روز و پرباری برای تأمین پیک بار شبکه باشد.