شرکت مدیریت تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران(توانیر)

دستورالعمل جامع برای انجام مطالعات اتصال نیروگاه‌های فتوولتاییک مقیاس بزرگ به شبکه

تهیه کننده:	تائید کننده:	تصویب کننده:
شرکت برق منطقه‌ای یزد	معاون برنامه‌ریزی و امور اقتصادی شرکت توانیر	مدیر عامل شرکت مادر تخصصی توانیر

فهرست مطالب

۱- فصل یک:تعاریف و مفاهیم اولیه ۷
۱-۱- مقدمه ۸
۱-۲- مفاهیم و اصطلاحات ۸
۲- فصل دوم: مطالعات اتصال به شبکه ۱۰
۲-۱- مقدمه ۱۱
۲-۲- جمع‌آوری و ارائه‌ی اطلاعات مورد نیاز ۱۱
۲-۲-۱- ارائه اطلاعات نیروگاه فتوولتاییک ۱۱
۲-۲-۲- جمع‌آوری و ارائه‌ی اطلاعات شبکه ۱۳
۲-۳- معرفی گزینه‌های اتصال به شبکه ۱۵
۲-۴- مطالعات پخش‌بار ۱۵
۲-۴-۱- فرضیات پخش‌بار ۱۵
۲-۴-۲- گزینه‌های پخش‌بار ۱۶
۲-۴-۳- محاسبه‌ی تلفات در شبکه با حضور منبع فتوولتاییک ۱۶
۲-۴-۴- رابطه‌ی تلفات برای شبکه‌ی یزد ۱۷
۲-۵- مطالعات پیشامد تک‌حادثه ۱۸
۲-۵-۱- فرضیات مطالعات پیشامد تک‌حادثه ۱۹
۲-۵-۲- انجام مطالعات پیشامد تک‌حادثه ۱۹
۲-۵-۳- جمع‌بندی مطالعات پخش‌بار و پیشامد تک‌حادثه ۱۹
۲-۵-۴- معرفی فرضیات مطالعات اقتصادی و ارزیابی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری گزینه‌های اتصال ۲۰
۲-۵-۵- جمع‌بندی مطالعات فنی و اقتصادی و تعیین گزینه برتر اتصال ۲۰

۶-۲- انجام مطالعات تکمیلی برای گزینه برتر اتصال ۲۰

۱-۶-۲- مطالعات اتصال کوتاه ۲۱

۲-۶-۲- مطالعات پایداری ۲۳

۳-۶-۲- مطالعات حفاظتی ۲۵

۴-۶-۲- مطالعات کیفیت توان ۲۵

۷-۲- جمع‌بندی نهایی ۲۷

۳- مراجع ۲۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱: مقادیر مجاز پارامترهای مورد بررسی در پخش‌بار ۱۵
جدول ۲-۲: گزینه‌های ضروری در مطالعات پخش‌بار شبکه ۱۶
جدول ۲-۳: میزان تابش متوسط ماهانه و سالانه‌ی استان یزد بر مبنای داده‌های تارنمای ناسا ۱۸
جدول ۲-۴: مقادیر مجاز پارامترهای مورد بررسی در مطالعات پیشامد تک‌حادثه ۱۹
جدول ۲-۵: حدود مجاز اعوجاج جریان در سطح ولتاژ ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت ۲۵
جدول ۲-۶: حدود مجاز اعوجاج جریان در سطح ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت ۲۶
جدول ۲-۷: حدود مجاز هارمونیک ولتاژ در شبکه ۲۶

مقدمه

افزایش بهره‌گیری از منابع فتوولتاییک از جهت موضوعات فنی - با توجه به نوپا بودن فناوری آن‌ها و تفاوت میان این منابع و منابع مرسوم- دغدغه‌های زیادی برای بهره‌برداران شبکه ایجاد کرده است. به گونه‌ای که تأثیرات این روند رو به افزایش، اگر به درستی پیش‌بینی نشود می‌تواند شبکه را دستخوش مشکلات پرشماری کند. مهم‌ترین دلیل برای تأکید بر وقوع مشکلات در صورت افزایش حضور منابع فتوولتاییک، ماهیت احتمالاتی تولید توان در این منابع و تولید بر پایه‌ی مبدل‌های الکترونیک قدرت است که سبب می‌شود از جهت ویژگی‌های فنی و پاسخ‌های سیستمی تفاوت‌های بنیادین با منابع موجود داشته باشند. افزایش نفوذ منابع مقیاس‌بزرگ فتوولتاییک که نسبت به منابع تولید پراکنده نوپاتر هستند، موضوعات جدی‌تری برای شبکه ایجاد می‌کند که همین موضوع ضرورت بررسی و آمادگی برای این شرایط را نشان می‌دهد.

چگونگی اتصال نیروگاه‌های فتوولتاییک به شبکه بر اساس ظرفیت و سطح ولتاژ اتصال آن‌ها به شبکه صورت می‌گیرد. در این دستورالعمل مطالعات اتصال به شبکه نیروگاه‌های با ظرفیت بزرگ‌تر از ۲۵ مگاوات و همچنین نیروگاه‌هایی که به شبکه‌ی انتقال مستقیماً متصل می‌شوند، بررسی خواهد شد، این نیروگاه‌ها در این دستورالعمل به عنوان نیروگاه های مقیاس‌بزرگ نامیده می‌شوند.

برای برآورد دقیق از وضعیت شبکه پس از ورود این مولدها بایستی مطالعات اتصال به شبکه با مدل‌سازی دقیق مولد فتوولتاییک صورت پذیرد و تأثیرات حضور این منابع بر شبکه کاملاً مورد مطالعه قرار بگیرد. مطالعات اتصال به شبکه پیش از هر چیز نیازمند دستورالعملی است که بر مبنای آن بتوان مطالعات را به صورت یکپارچه صورت داد و هدف اصلی این دستورالعمل در حقیقت همین موضوع بوده است.

در این دستورالعمل ابتدا در فصل ۱ اصطلاحات و مفاهیم استفاده‌شده بیان می‌شود، در فصل ۲ موارد ضروری که در مطالعه‌ی طرح اتصال باید در نظر گرفته شود، مشخص خواهد شد. سرفصل‌های مورد نیاز در یک گزارش مطالعه‌ی اتصال به شبکه در فصل ۲ بیان خواهد شد که عبارت‌اند از:

- ارائه‌ی اطلاعات نیروگاه فتوولتاییک
- جمع‌آوری و ارائه اطلاعات شبکه
- معرفی گزینه‌های اتصال به شبکه
- معرفی فرضیات پخش‌بار، گزینه‌های پخش‌بار و انجام مطالعات پخش‌بار
- معرفی فرضیات پیشامد تک‌حادثه و انجام مطالعات پیشامد تک‌حادثه
- جمع‌بندی مطالعات پخش‌بار و پیشامد تک‌حادثه و اولویت‌بندی فنی گزینه‌های اتصال

- معرفی فرضیات مطالعات اقتصادی و ارزیابی هزینه‌های سرمایه‌گذاری گزینه‌های اتصال
- جمع‌بندی مطالعات فنی و اقتصادی و تعیین گزینه برتر اتصال
- انجام مطالعات تکمیلی برای گزینه برتر اتصال
- جمع‌بندی نهایی

فصل یک:تعاریف و مفاهیم اولیه

۱-۱- مقدمه

در این فصل به طور اجمالی برخی از مفاهیم و مواردی که در متن دستورالعمل استفاده شده اشاره می‌شود. طبیعی است مواردی که در این فصل توضیح داده می‌شوند، منطبق بر توضیحات ارائه شده در همین فصل، در دستورالعمل استفاده شده‌اند و سایر برداشت‌های ممکن از مفاهیم در این دستورالعمل کاربردی ندارد.

۱-۲- مفاهیم و اصطلاحات

نیروگاه مقیاس‌بزرگ: نیروگاه‌هایی که دارای ظرفیت بیشتر از ۲۵ مگاوات هستند و یا نیروگاه‌هایی که مستقیماً به شبکه‌ی انتقال متصل می‌شوند.

رشته‌ای فتوولتاییک: مجموعه پنل‌هایی که به طور سری و موازی به یکی از ورودی‌های اینورتر متصل می‌شوند.

آرایه‌ای فتوولتاییک: مجموعه پنل‌هایی که در آرایش‌های مختلف و در شکل چند رشته‌ی مستقل به یک اینورتر متصل می‌شوند.

P_{max} : بیشینه توان خروجی یک پنل در شرایط تابش استاندارد

V_{mp}: ولتاژ در نقطه‌ی توان خروجی بیشینه‌ی پنل است.

I_{mp} : جریان در نقطه‌ی توان خروجی بیشینه‌ی پنل است.

V_{oc} : نشان‌دهنده‌ی ولتاژ پنل در وضعیت مدارباز است.

I_{sc} : نشان‌دهنده‌ی جریان خروجی پنل در وضعیت اتصال‌کوتاه است.

گزینه پخش‌بار: وضعیت مشخصی که برای پخش‌بار بررسی می‌شود. به عنوان مثال وضعیت اوج بار و تولید حداکثری نیروگاه‌ها یک گزینه‌ی پخش‌بار است.

گزینه اتصال: آرایش خاصی که برای اتصال نیروگاه به شبکه اتخاذ می‌شود. برای نمونه هنگامی که برای اتصال به شبکه از ورود و خروج به یک خط و یا از اتصال به یک ایستگاه استفاده می‌شود، هر یک آرایش‌های مختص خود را دارند که یک گزینه اتصال محسوب می‌شوند.

---

[1] String

[2] Array

حالت کنترل توان اکتیو : یک اینورتر حالت‌های کنترل توان اکتیو متنوعی می‌بایست داشته باشد که از مهم‌ترین موارد آن می‌توان به ۱) حالت برش توان[۱] ۲)حالت توان اختلافی[۲] ۳) حالت کنترل آهنگ تغییرات[۳] و ۴) دنبالگر نقطه‌ی توان بیشینه mppt[۴] اشاره کرد.

حالت برش توان: محدود کردن بیشینه توان تولیدی بر روی مقدار مشخص به گونه‌ای که گرچه سیستم ظرفیت تولید بیشتر را داشته باشد اما به دلیل این کنترل، خروجی توان از حد مشخصی فراتر نخواهد رفت.

حالت توان اختلافی: قرار دادن درصد مشخصی از ظرفیت تولید توان به صورت رزرو به گونه‌ای که مستقل از میزان توان تولیدی درصدی از آن برای قابلیت کنترل فرکانس رزرو شده باشد.

حالت کنترل آهنگ تغییرات: کنترل میزان تغییرات و محدود کردن آهنگ تغییرات توان تولیدی بر روی مقدار مشخص که محدودکننده‌ی تغییرات توان است.

دنبالگر نقطه‌ی توان بیشینه mppt: دنبالگر نقطه‌ی توان بیشینه کنترلی است که توان حداکثری از مولد را در هر لحظه دریافت و به شبکه تزریق می‌کند.

حالت کنترل توان راکتیو: یک اینورتر حالت‌های کنترل توان راکتیو متنوعی می‌بایست داشته باشد که از مهم‌ترین موارد آن می‌توان به ۱) حالت توان راکتیو ثابت ۲) حالت ضریب توان ثابت ۳) حالت کنترل ولتاژ اشاره کرد.

حالت توان راکتیو ثابت: ثابت قرار دادن میزان Q تزریقی بر روی مقداری مشخص و مستقل از P

حالت ضریب توان ثابت: ثابت قرار دادن نسبت P و Q در تمامی نقاط مجاز بازه‌ی کار

حالت کنترل ولتاژ: تعیین میزان Q بر مبنای قرار دادن مقدار ولتاژ شینه در بازه‌ای مشخص

مشخصه‌ی فرکانس-توان : مشخصه‌ای است که در آن مولد بر مبنای فرکانس شبکه میزان تولید خود را مشخص می‌کند. اگر فرکانس در بازه‌ی مشخص باشد توان مولد می‌تواند در مقدار نامی قرار بگیرد. در صورتی که فرکانس از میزانی بیشتر شود، تولید نیروگاه باید متناسب با افزایش فرکانس کاهش یابد. در صورتی که مولدها در کنترل اولیه‌ی فرکانس نقش داشته باشند، با کاهش فرکانس از میزانی مشخص تولید مولدها با استفاده از ظرفیت رزرو خود بایستی افزایش یابد تا فرکانس کنترل شود.

مدل دینامیکی سیستم فتوولتاییک: مدلی که برای شبیه‌سازی و پاسخ زمانی مولدهای فتوولتاییک استفاده می‌شود. این مدل مبنای مطالعات پایداری قرار می‌گیرد.

---

[۱] Absolute production constraint
[۲] Delta production constraint
[۳] Power gradient constraint
[۴] maximum power point tracking

فصل دوم: مطالعات اتصال به شبکه

۲-۱- مقدمه

مطالعات اتصال به شبکه‌ی یک نیروگاه فتوولتاییک همان‌گونه که اشاره شد، بایستی به طور جامع موضوعات پیش رو برای شبکه برخاسته از حضور این منابع را در بربگیرد. در ادامه مهم‌ترین بخش‌هایی که در این مطالعات بایستی پوشش داده شود، به همراه جزئیات و خروجی‌های نهایی مورد انتظار از هر بخش توضیح داده شده است.

۲-۲- جمع‌آوری و ارائه‌ی اطلاعات مورد نیاز

جمع‌آوری اطلاعات مربوط به نیروگاه، محل اتصال آن و شبکه‌ی مورد بررسی از جمله مهم‌ترین اقداماتی است که در خصوص مطالعات یک شبکه بایستی صورت پذیرد. همچنین لازم است تا بخش‌های مهم اطلاعات جمع‌آوری شده در گزارش ارائه شود تا فرضیات مدل‌سازی کاملاً روشن باشد. در ادامه مهم‌ترین مواردی که در گزارش بایستی ارائه شود بیان می‌گردد:

۲-۲-۱- ارائه اطلاعات نیروگاه فتوولتاییک

در خصوص یک نیروگاه فتوولتاییک بایستی اطلاعات پایه‌ای نیروگاه بیان گردد. این اطلاعات عبارت‌اند از:

- اطلاعات جغرافیایی:
  - مختصات محل نیروگاه (طول و عرض جغرافیایی)
  - برآورد از میانگین تابش در منطقه در ماه‌های مختلف سال برای برآورد تولید نیروگاه در کم‌باری و اوج بار

- اطلاعات ایستگاه:
  - تعیین آرایش فشار ضعیف ایستگاه اصلی نیروگاه
  - ارائه تعداد و مشخصات اصلی ترانس‌های نیروگاه (ظرفیت ترانس، امپدانس اتصال‌کوتاه، نسبت تبدیل، گروه برداری، مشخصات امپدانسی توالی مثبت، صفر)

- مشخصات پنل‌های فتوولتاییک
  - برند پنل انتخابی
  - بیشینه توان خروجی یک پنل در شرایط تابش استاندارد (STC)
  - ولتاژ در نقطه‌ی توان خروجی بیشینه‌ی پنل

- جریان در نقطه‌ی توان خروجی بیشینه‌ی پنل
- ولتاژ پنل در وضعیت مداربار
- جریان خروجی پنل در وضعیت اتصال‌کوتاه
- ضریب تغییر توان در دما
- ابعاد هر پنل
- تعداد پنل‌ها
- مشخص کردن آرایش پنل‌ها در هر رشته و هر آرایه

- مشخصات اولیه‌ی اینورتر
- برند اینورتر
- ولتاژ نامی
- توان ظاهری نامی
- توان اکتیو نامی
- توان راکتیو نامی
- بیشینه جریان قابل تحمل
- ضریب توان نامی
- میزان جریان گذرا و ماندگار اینورتر هنگام اتصال‌کوتاه به همراه بیشترین زمان مشارکت در تأمین جریان اتصال‌کوتاه
- تعداد اینورترها
- تعداد و مشخصات ترانسفورماتورهای متصل به هر اینورتر

- منحنی‌های مشخصات توانی اینورتر
- منحنی ظرفیت (P-Q) اینورتر
- مشخصه‌ی فرکانس – توان اکتیو اینورتر
- مشخصه‌ی ولتاژ-توان راکتیو اینورتر
- ارائه‌ی حالت‌های کنترلی موجود در کنترل توان اکتیو
- محدود کردن توان خروجی (برش توان)

- توان رزرو یا اختلافی
- محدود کردن تغییرات توان (کنترل آهنگ تغییرات)
- کنترل دنبالگر بیشینه توان خروجی

- ارائه‌ی حالت‌های کنترلی موجود در کنترل توان راکتیو
- توان راکتیو ثابت
- ضریب توان ثابت
- کنترل ولتاژ

- ارائه‌ی مدل دینامیکی اینورتر
- مدل در برگیرنده‌ی مشخصات توانی کنترلی اینورتر

- ارائه‌ی مشارکت هارمونیکی اینورتر
- میزان تزریق هارمونیک‌های مختلف جریان در مقادیر مختلف تولید توان نیروگاه (از تولید صفر تا تولید نامی به صورت پله‌های ۰٫۱ پریونیت)

اطلاعات ارائه شده مبنای شبیه‌سازی نیروگاه خواهد بود و بایستی شبیه‌سازی صورت یافته اطلاعات پایه‌ای این بخش را تائید کند.

۲-۲-۲- جمع‌آوری و ارائه‌ی اطلاعات شبکه

مدل‌سازی شبکه بایستی تمامی بخش‌های اثرگذار بر مطالعات و اثرپذیر از ورود نیروگاه را شامل شود. تعیین بخش‌های دارای تأثیر و مرزهای این بخش‌ها در شبکه بایستی با استفاده از دانش و تجربه‌ی مسئولین برق منطقه‌ای و بهره‌برداران شبکه صورت پذیرد. مدل‌سازی شبکه بایستی شامل موارد زیر تا سطوح ولتاژ مؤثر در مطالعه[1] باشد:

- تعیین سال افق برای انجام مطالعه
- اطلاعات نیروگاه‌های موجود در منطقه

[1] سطوح ولتاژ مؤثر: تمامی شبکه‌ی انتقال منطقه با تبادلات موجود با سایر مناطق هم‌جوار در صورت اتصال مولد به سطح ولتاژ انتقال، تمامی شبکه‌ی انتقال و فوق توزیع منطقه با تبادلات موجود با سایر مناطق هم‌جوار در صورت اتصال مولد به سطح ولتاژ فوق توزیع

- ظرفیت نیروگاه
- تعداد واحدهای نیروگاه
- ظرفیت هر واحد
- نسبت تبدیل ترانسفورماتور هر واحد

- اطلاعات واحدهای نیروگاهی
- ثابت اینرسی ژنراتور
- راکتانس‌های ماندگار و گذرا در مدل‌سازی ژنراتور
- ثابت‌های زمانی مربوط به رفتار دینامیکی هر ژنراتور

- اطلاعات ایستگاه‌های انتقال و فوق توزیع
- ظرفیت و تعداد و مشخصات کامل ترانسفورماتورها
- ظرفیت و تعداد راکتورها
- ظرفیت و تعداد خازن‌ها

- اطلاعات مربوط به خطوط (خطوط منطقه و خطوط تبادلی)
- نقطه‌ی آغاز و پایان خط
- تعداد مدار خط (تک‌مداره، دومداره)
- طول خط
- امپدانس خط در هر کیلومتر
- نوع هادی خط

- اطلاعات مربوط به بار
- ارائه‌ی بار ایستگاه‌ها در پیک بار همزمان منطقه در سال افق مطالعات
- ارائه‌ی بار پستها در کم‌باری همزمان منطقه در سال افق مطالعات

۲-۳- معرفی گزینه‌های اتصال به شبکه

پس از گزارش اطلاعات و مشخصات نیروگاه و شبکه‌ی مورد نظر گام دیگر برای انجام مطالعات طرح اتصال تعیین نوع و آرایش اتصال است. در این موضوع موارد زیر دارای اهمیت است.

- ظرفیت نیروگاه
- فاصله‌ی نیروگاه تا خطوط و ایستگاه‌های مجاور
- ظرفیت بارگذاری خطوط و ایستگاه‌ها پیش از اتصال مولد به شبکه

در این بخش بایستی با توجه به این موارد گزینه‌های اتصال مولد به شبکه را تعیین و در خصوص آن توضیح اجمالی ارائه داد. خروجی این بخش عبارت است از

- گزینه بندی جهت اتصال مولد به شبکه بر مبنای فاصله‌ی نیروگاه از نقاط ممکن جهت اتصال
- ارائه دیاگرام تک‌خطی برای هرگزینه‌ی اتصال

با استفاده از مواردی که بدان اشاره شد، برخی از نقاط شبکه طبیعتاً به عنوان گزینه‌ی اتصال مطرح خواهند شد. برای تعیین بهترین نقطه برای اتصال مولد به شبکه علاوه بر موارد فنی، موضوعات اقتصادی نیز بسیار اثرگذارند و باید بررسی شوند که در ادامه اشاره می‌شود.

۲-۴- مطالعات پخش‌بار

مطالعات پخش‌بار برای هر شبکه‌ای ضروری و بیانگر وضعیت شبکه در حالت ماندگار است. این مطالعات تعادل توانی شبکه را در وضعیت ماندگار بررسی کرده و با در نظر گرفتن فرضیاتی ابزاری برای تجزیه و تحلیل پارامترهای شبکه فراهم می‌کند.

۲-۴-۱- فرضیات پخش‌بار

مهم‌ترین پارامترهای شبکه که در مطالعات پخش‌بار بررسی می‌شود، پروفیل ولتاژ و تغییرات بارگذاری تجهیزات در شرایط کم‌باری و اوج بار است.

پارامترهای مهم و حدود مجازی که برای پارامترهای شبکه بایستی در نظر گرفته بشود در جدول ۲-۱ ارائه شده است.

جدول ۲-۱: مقادیر مجاز پارامترهای مورد بررسی در پخش‌بار

پارامتر مورد بررسی	بارگذاری خطوط (٪)	بارگذاری ترانسفورماتورها (٪)	افزایش ولتاژ (pu)	کاهش ولتاژ (pu)
مقدار مجاز	۱۰۰*	۱۰۰*	۱,۰۵	۰,۹۵

* فاکتور derating در هر منطقه در این مقدار ضرب شود.

۲-۴-۲- گزینه‌های پخش‌بار

مطالعات پخش‌بار در شبکه‌های دارای نیروگاه تجدیدپذیر، با توجه به وابستگی این نیروگاه‌ها به وضعیت آب و هوایی منطقه کمی متفاوت با سایر نیروگاه‌هاست. بر همین مبنا حالات مورد بررسی در مطالعات پخش‌بار شبکه را می‌توان با توجه به وضعیت بار، وضعیت تولید نیروگاه‌های مرسوم موجود در منطقه‌ی مورد بررسی، وضعیت سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر در منطقه و وضعیت نیروگاه فتوولتاییک مورد مطالعه در هر یک از گزینه‌های اتصال، به صورت جدول ۲-۲ در نظر گرفت:

جدول ۲-۲: گزینه‌های ضروری در مطالعات پخش‌بار شبکه

پیش از اتصال نیروگاه مورد مطالعه			
شماره گزینه	وضعیت بار	سایر نیروگاه‌های منطقه	نیروگاه مورد مطالعه
۱	کم‌باری	با ظرفیت کامل در مدار	-
۲	اوج بار	با ظرفیت کامل در مدار	-
پس از اتصال نیروگاه مورد مطالعه			
شماره گزینه	وضعیت بار	سایر نیروگاه‌های منطقه	نیروگاه مورد مطالعه
۳	اوج بار	خارج از سرویس	با ظرفیت کامل در مدار
۴	کم‌باری	خارج از سرویس	با ظرفیت کامل در مدار
۵	اوج بار	با ظرفیت کامل در مدار	با ظرفیت کامل در مدار
۶	کم‌باری	با ظرفیت کامل در مدار	با ظرفیت کامل در مدار

حالات در نظر گرفته شده در جدول ۲-۲ با نام گزینه‌ی پخش‌بار معرفی می‌شوند. از میان گزینه‌های پخش‌باری که در جدول ۲-۲ بیان شده دو مورد اول برای پیش از اتصال مولد به شبکه بایستی بررسی شود و چهار مورد پایانی بایستی برای تمامی گزینه‌های اتصال مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای مهم شبکه که در بخش فرضیات پخش‌بار معرفی شد، در شرایط مربوط به هریک، مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲-۴-۳- محاسبه‌ی تلفات در شبکه با حضور منبع فتوولتاییک

یکی از مهم‌ترین محاسبات برخاسته از پخش‌بار علاوه بر موارد یادشده میزان تلفات شبکه پس از اتصال نیروگاه است. در محاسبات تلفات یک نیروگاه تازه وارد به شبکه باید موارد زیر را در نظر گرفت:

۱) اگر نیروگاه به هر دلیلی در زمان مشخصی در مدار نیست و در سایر زمان‌ها در مدار است، با توجه به این که این در مدار بودن یا نبودن تلفات شبکه را تغییر می‌دهد، بایستی تلفات برآیند با در نظر گرفتن زمان حضور و عدم حضور نیروگاه محاسبه شود.

۲) با توجه به این که ممکن است شیوه‌ی اتصال نیروگاه بخشی از شبکه را دستخوش تغییر کند، - مثلاً افزایش طول خط به دلیل ورود و خروج نیروگاه به خط – در بررسی تلفات در وضعیت پایه نیز بایستی این تغییرات شبکه دیده شود. یعنی اگر به دلیلی در زمان مشخصی نیروگاه در مدار نباشد این تغییر در شبکه در محاسبات تلفات شبکه بدون حضور نیروگاه همچنان باید لحاظ گردد.

محاسبه‌ی تلفات در مورد نیروگاه‌های فتوولتاییک کمی پیچیده‌تر از سایر نیروگاه‌هاست. نیروگاه فتوولتاییک دارای میزان توان نامی مشخصی است که در شرایط STC می‌تواند این میزان توان را تولید نماید. به طور مشخص، یک نیروگاه فتوولتاییک توانایی تولید مقدار توان نامی را در شرایط زمانی و آب‌وهوایی مختلف نخواهد داشت؛ از این رو برای یک منطقه‌ی مشخص از پارامتر دیگری به نام ساعات تابش STC استفاده می‌شود. این پارامتر مشخص می‌کند که در طول بازه‌ی زمانی طلوع تا غروب میزان انرژی دریافتی از خورشید به اندازه‌ی چند ساعت دریافت انرژی در شرایط STC است.

با استفاده از این شاخص می‌توان کارکرد سیستم فتوولتاییک را در شبانه‌روز به این شکل ساده‌سازی کرد که این نیروگاه به میزان این شاخص (ساعات تابش STC) در شرایط نامی توان تولید می‌کند و به ازای سایر ساعات شبانه‌روز توانی تولید نمی‌کند و بر همین مبنا می‌توان تلفات مربوط به این شرایط را محاسبه کرد.

جهت محاسبه‌ی مقدار تلفات از فرمول تجربی به شرح ذیل استفاده شده است :

$$P_{loss} = \alpha \times P_{loss_{with\ PV\ farm}} + (1 - \alpha) \times P_{loss_{without\ PV\ Farm}}$$

در این رابطه $P_{loss_{without\ PV\ farm}}$ تلفات شبکه بدون حضور نیروگاه فتوولتاییک ولی با وجود اتصالات مربوط به شبکه است و $P_{loss_{with\ PV\ farm}}$ تلفات شبکه با حضور نیروگاه فتوولتاییک می‌باشد. همچنین α میزان ساعات تابش در شرایط STC تقسیم بر ۲۴ ساعت را بیان می‌کند.

۴-۴-۲- رابطه‌ی تلفات برای شبکه

در این بخش مثالی از نحوه محاسبه تلفات در حضور منابع فتوولتاییک در منطقه یزد تشریح شده است. برای محاسبات تلفات به میزان تابش یک منطقه نیاز است، در جدول ۲-۳ اطلاعات تابش استان یزد ارائه شده است [].

لازم به توضیح است که برای استان یزد طول جغرافیایی ۵۴٫۴۳ و عرض جغرافیایی ۳۱٫۱ در نظر گرفته شده است.

این داده‌ها برای تمامی ماه‌های سال ارائه شده است؛ و لازم است با توجه به موقعیت جغرافیایی نیروگاه فتوولتائیک و ماههای کم‌باری و پرباری منطقه مبنا قرار گیرد. بر این اساس رابطه‌ی تلفات حضور نیروگاه فتوولتاییک برای استان یزد محاسبه شده است.

$$P_{loss} \simeq ۰.۲۴۵ \times P_{loss_{with\ PV\ farm}} + ۰.۷۵۵ \times P_{loss_{without\ PV\ Farm}}$$

جدول ۲-۳: میزان تابش متوسط ماهانه و سالانه‌ی استان یزد بر مبنای داده‌های تارنمای ناسا

Lat 31.1 Lon 54.43	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	متوسط ماههای اوج بار
SSE HRZ	۳.۴۷	۴.۵۵	۵.۱۷	۵.۹۷	۶.۸۷	۷.۲۶	۷.۰۲	۶.۷۲	۵.۹۵	۴.۸۶	۳.۷۸	۳.۲۱	۵.۴
K	۰.۶	۰.۶۴	۰.۵۹	۰.۵۸	۰.۶۱	۰.۶۳	۰.۶۲	۰.۶۴	۰.۶۴	۰.۶۴	۰.۶۲	۰.۶	۰.۶۲
Diffuse	۰.۸۸	۱.۰۳	۱.۵۳	۱.۹۱	۲.۰۵	۲.۰۸	۲.۰۶	۱.۷۹	۱.۴۶	۱.۱۳	۰.۹	۰.۸۱	۱.۴۷
Direct	۵.۸۳	۶.۸۴	۶.۱۴	۶.۲۲	۷.۱۱	۷.۵۷	۷.۲۷	۷.۴۱	۷.۲۶	۶.۸۸	۶.۲۲	۵.۶۷	۶.۷
Tilt 0	۳.۴	۴.۵۲	۵.۱۱	۵.۸۴	۶.۸۴	۷.۲۲	۶.۹۹	۶.۶۹	۵.۸۶	۴.۸۲	۳.۶۹	۳.۱۶	۵.۳۵
Tilt 16	۴.۳۵	۵.۴۶	۵.۶۴	۶.۰۳	۶.۷۲	۶.۹۵	۶.۷۸	۶.۷۵	۶.۳۳	۵.۶۶	۴.۶۵	۴.۱۴	۵.۷۹
Tilt 31	۴.۹۹	۶.۰۳	۵.۸۳	۵.۹	۶.۲۵	۶.۳۳	۶.۲۴	۶.۴۴	۶.۴۲	۶.۱۲	۵.۲۷	۴.۸۲	۵.۸۸
Tilt 46	۵.۳۴	۶.۲۶	۵.۷	۵.۴۶	۵.۴۸	۵.۳۹	۵.۳۹	۵.۸	۶.۱۷	۶.۲۳	۵.۶	۵.۲۱	۵.۶۶
Tilt 90	۴.۵۸	۴.۸۹	۳.۷۳	۲.۸۴	۲.۳۶	۲.۱۱	۲.۲۱	۲.۷۲	۳.۶۶	۴.۶۱	۴.۶۸	۴.۶۱	۳.۵۷
OPT	۵.۴	۶.۲۶	۵.۸۳	۶.۰۳	۶.۸۵	۷.۲۲	۶.۹۹	۶.۷۷	۶.۴۳	۶.۲۴	۵.۶۳	۵.۳۱	۶.۲۵
OPT ANG	۵۵	۴۸	۳۳	۱۷	۳	۰	۰	۱۰	۲۷	۴۳	۵۳	۵۸	۲۸.۸

همان‌گونه که در جدول ۲-۳ مشاهده می‌شود، تابش در تمامی وضعیت‌های نصب پنل‌ها برآورد شده است اما با توجه به زاویه‌ی نصب ثابت پنل‌ها متوسط تابش سالیانه در یک روز که با رنگ زرد مشخص شده است، ملاک عملکرد قرار گرفته است و میزان تابش روزانه KWH/m^2 ۵،۸۸ در نظر گرفته شده است. لازم است با توجه به موقعیت جغرافیایی، چگونگی نصب پنل‌ها و همچنین ماههای اوج بار و کم‌باری هر منطقه نسبت به استخراج ضرایب مربوطه از جداول مشابه و محاسبه تلفات اقدام نمود.

۲-۵- مطالعات پیشامد تک‌حادثه

یکی دیگر از مهم‌ترین مطالعاتی که در خصوص اتصال یک مولد به شبکه بایستی انجام شود، مطالعات پیشامد تک‌حادثه بر روی تجهیزات شبکه است. هدف از این مطالعات بررسی شبکه از جهات گوناگون در صورت خروج یکی از تجهیزات اصلی است. تجهیزاتی که در اینجا مطرح است، عبارت‌اند از:

- خطوط
- ترانسفورماتورهای ایستگاه‌ها (ترانسفورماتورهای واحدهای نیروگاهی در نظر گرفته نمی‌شود.)

۱-۵-۲- فرضیات مطالعات پیشامد تک‌حادثه

این مطالعات با در نظر گرفتن تمامی گزینه‌های اتصال صورت می‌پذیرد. از جهت گزینه‌های پخش‌بار این مطالعات لازم است در وضعیت اوج بار و کم‌باری قبل و بعد از اتصال نیروگاه فتوولتاییک بررسی شود. محدودیت‌های مورد بررسی در جدول ۲-۴ آمده است.

جدول ۲-۴: مقادیر مجاز پارامترهای مورد بررسی در مطالعات پیشامد تک‌حادثه

پارامتر مورد بررسی	بارگذاری خطوط (٪)	بارگذاری ترانسفورماتورها (٪)	افزایش ولتاژ (pu)	کاهش ولتاژ (pu)
مقدار مجاز	۱۰۰	۱۰۰	۱,۰۵	۰,۹

۲-۵-۲- انجام مطالعات پیشامد تک‌حادثه

مبتنی بر فرضیات مطالعات پیشامد تک‌حادثه برای تمامی گزینه‌های اتصال، مطالعات پیشامد تک‌حادثه صورت می‌پذیرد. با این مطالعات گزینه‌هایی که از جهت بررسی پیشامد تک‌حادثه محدودیت‌ها را نقض می‌کنند، شناسایی می‌شوند. در صورتی که یک گزینه اتصال، برای شبکه ایجاد مشکل نماید، این گزینه به عنوان گزینه دارای مشکل فنی شناسایی می‌شود. البته این موضوع در صورتی صحیح است که شبکه پیش از اتصال مولد از جهت مطالعات پیشامد تک‌حادثه نقض‌کننده‌ی محدودیت‌ها نباشد. بدیهی است در صورت وجود مشکل قبل از اتصال نیروگاه لازم است ابتدا طرح اصلاحی پیشنهاد گردیده و نهایتا بعد از اتصال نیروگاه وضعیت شبکه بهبود یابد.

۳-۵-۲- جمع‌بندی مطالعات پخش‌بار و پیشامد تک‌حادثه

با استفاده از نتایج پخش‌بار و پیشامد تک‌حادثه، وضعیت کلی شبکه پیش از اتصال مولد مورد مطالعه ارزیابی می‌شود. سپس برای گزینه‌های اتصال مختلف مطالعات پخش‌بار صورت می‌پذیرد و پس از آن مطالعات پیشامد تک‌حادثه وضعیت شبکه را پس از ورود منابع در گزینه‌های مختلف ارزیابی می‌کند. گزینه‌هایی که محدودیت‌های شبکه را نقض یا تشدید می‌کنند به عنوان گزینه دارای ایراد فنی تشخیص داده شده و از روند مطالعات حذف می‌شوند. به این ترتیب تنها گزینه‌های مورد تائید در این بخش از مطالعات، در ادامه‌ی روند مطالعه که مقایسه‌ی اقتصادی گزینه‌هاست، باقی می‌مانند.

۲-۵-۴- معرفی فرضیات مطالعات اقتصادی و ارزیابی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری گزینه‌های اتصال

پس از حذف گزینه‌های دارای ایراد فنی، گزینه‌های مورد تائید بایستی از جهت اقتصادی با یکدیگر مقایسه شوند. در این مرحله تمامی گزینه‌های تأییدشده بدون هیچ‌گونه اولویت با یکدیگر از جهت هزینه‌ی طرح‌ها مقایسه و اولویت‌بندی می‌شوند. در مقایسه‌ی اقتصادی طرح‌ها موارد زیر دارای اهمیت هستند:

- هزینه‌ی تجهیزات مربوط به هر گزینه (خط، بی، ترانس)
- هزینه‌ی زیرساخت‌های مورد نیاز در هر گزینه (احداث ایستگاه، سازه‌های متناسب)
- هزینه‌ی تلفات در هر گزینه (معمولاً هزینه‌ی تلفات به صورت ریال بر مگاوات مشخص است و بهره‌برداران شبکه مقدار آن را با روشهای محاسباتی خاصی تعیین می‌کنند.)
- هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری از تجهیزات اضافه شده

بر طبق مقدار مجموع این هزینه‌ها تمامی گزینه‌ها بررسی شده و به ترتیب افزایشی طرح‌ها اولویت‌بندی و ارائه می‌شوند.

۲-۵-۵- جمع‌بندی مطالعات فنی و اقتصادی و تعیین گزینه برتر اتصال

همان‌گونه که بیان شد با در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و اقتصادی گزینه‌ها ارزیابی، برخی از آن‌ها حذف و گزینه‌های تأییدشده اولویت‌بندی می‌شوند. بر طبق اولویت، اولین گزینه‌یی که با مشورت کارشناسان شبکه قابلیت اجرا دارد، به عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود. پس از انتخاب گزینه برتر، بایستی مطالعات تکمیلی تنها برای این گزینه صورت گرفته و نتایج آن ارائه شود

۲-۶- انجام مطالعات تکمیلی برای گزینه برتر اتصال

پس از انتخاب گزینه برتر، بایستی مطالعات تکمیلی بر روی این گزینه صورت پذیرد. این مطالعات شامل موارد زیر است:

- مطالعات اتصال کوتاه
- مطالعات پایداری
- مطالعات کیفیت توان
- مطالعات حفاظتی (در صورت لزوم)

در ادامه هریک از این مطالعات توضیح داده خواهند شد.

۱-۶-۲- مطالعات اتصال کوتاه

گام مهم دیگری که در مطالعات اتصال به شبکه ضروری است، مطالعات اتصال کوتاه است. مهم‌ترین کاری که در این مطالعات بایستی انجام شود، بررسی تغییر سطح اتصال کوتاه شبکه بر اثر حضور نیروگاه مورد مطالعه است.
برای همین منظور بدون نیروگاه مورد مطالعه و با حضور آن در گزینه‌ی برتر سطح اتصال کوتاه شبکه در باس‌بارهای مختلف بررسی می‌شود تا تغییرات مشخص شوند. در صورتی که این تغییرات قابل توجه باشد و باعث شود تا جریان اتصال کوتاه از قدرت قطع کلیدها فراتر رود، بایستی در خصوص برآورد هزینه و امکان‌پذیری تعویض تجهیزات پیش‌بینی لازم با مشورت بهره‌برداران شبکه صورت پذیرد. در صورتی که گزینه منتخب از لحاظ اتصال کوتاه طرح اتصال را با مشکل فنی رو به رو نماید و تعویض تجهیزات برای تحمل سطح اتصال کوتاه امکان پذیر باشد باید هزینه انجام کار به هزینه گزینه اتصال اضافه گردیده و گزینه‌های اتصال مجددا اولویت بندی گردند.

۱-۱-۶-۲- فرضیات ضروری اتصال کوتاه

واحدهای فتوولتاییک برای تزریق توان به شبکه از مبدل‌های متناسب استفاده می‌کنند. این مبدل‌ها به نوعی کنترل مشخص بر روی مشارکت واحدها در اتصال‌کوتاه خواهند داشت. این کنترل بدین صورت است که میزان مشارکت واحدها به طور ثابت در تأمین جریان اتصال‌کوتاه مشخص خواهد بود. از این جهت مطالعات اتصال‌کوتاه در نیروگاه‌های فتوولتاییک، دغدغه‌ی کمتری از واحدهای مرسوم خواهد داشت و مشارکت واحدهای فتوولتاییک قابل محاسبه و برنامه‌ریزی است. مهم‌ترین مواردی که در مطالعات اتصال‌کوتاه باید در نظر گرفته شود عبارت‌اند از :

- مطالعات اتصال‌کوتاه بایستی دربرگیرنده‌ی تمامی حالات اتصال‌کوتاه شامل خطای سه‌فاز و تکفاز باشد.
- نیروگاه‌های فتوولتاییک با توجه به تفاوت بنیادینی که با منابع مرسوم دارند، مشارکت متفاوتی نیز در جریان اتصال‌کوتاه خواهند داشت. این مشارکت بایستی بر مبنای استاندارد IEC-60909-0 محاسبه شود.

۲-۱-۶-۲- محاسبات اتصال کوتاه بر مبنای استاندارد IEC 60909-0

استاندارد IEC 60909-0 در سال ۲۰۱۶ در محاسبات اتصال‌کوتاه با رویکرد در نظر گرفتن مشارکت منابع اینورتری بازنگری شده است. بر مبنای این استاندارد جریان اتصال‌کوتاه با حضور منابع تمام‌مبدلی و شبکه بایستی به صورت جمع آثار محاسبه شود. به این ترتیب که جریان اتصال‌کوتاه بدون حضور منابع اینورتری محاسبه و سپس اثرات حضور این منابع نیز به جریان افزوده شود. رابطه‌ی محاسبه‌ی جریان اتصال‌کوتاه سه‌فاز در ادامه آورده شده است.

$$I''_{kmax} = \frac{1}{Z_{ii}} \frac{U_n . c_{max}}{\sqrt{3}} + \frac{1}{Z_{ii}} \sum_{j=1}^{n} z_{ij} . I_{skPFj} = I''_{kmaxPFO} + I''_{kPF}$$

که در آن:

c_{max}: ضریب ولتاژ

I_{skPFj}:مقدار مؤثر جریان بیشینه‌ی منبعِ دارای مبدل در هنگام اتصال‌کوتاه است. این مقدار را سازنده به عنوان مشخصات مبدل ارائه می‌دهد.

Z_{ii} و Z_{ij}: مقادیر امپدانس از ماتریس امپدانس مؤلفه‌ی مثبت است که در آن i شماره باس دارای اتصال‌کوتاه و j شماره‌ی تمامی باس‌هایی است که در آن یک منبع با مبدل کامل قرار گرفته است.

$I''_{kmaxPFO}$: بیشینه جریان اتصال‌کوتاه که بدون تأثیر منابع تمام‌مبدلی در یک باس مشخص به دلیل حضور شبکه رخ می‌دهد

I''_{kPF} : مجموع مشارکت منابع تمام‌مبدلی در جریان اتصال‌کوتاه باسبار هدف است.

همچنین برای محاسبه‌ی اتصال‌کوتاه تکفاز نیز بایستی از رابطه‌ی زیر استفاده شود.

$$I''_{k1max} = \frac{3}{|Z_{(1)ii} + Z_{(2)ii} + Z_{(0)ii}|} \frac{U_n . c_{max}}{\sqrt{3}} + \frac{3}{|Z_{(1)ii} + Z_{(2)ii} + Z_{(0)ii}|} \sum_{j=1}^{n} z_{(1)ij} . I_{(1)sk1PFj}$$

$$= I''_{k1maxPFO} + I''_{k1PF}$$

که در آن:

$I_{(1)sk1PFj}$:مقدار مؤثر جریان بیشینه‌ی منبعِ دارای مبدل (مؤلفه‌ی مثبت) در هنگام اتصال‌کوتاه تکفاز است. این مقدار را سازنده به عنوان مشخصات مبدل ارائه می‌دهد.

$Z_{(1)ii} = Z_{ii}$: مقدار درایه‌ی i ام بر روی قطر ماتریس امپدانس مؤلفه‌ی مثبت است که در آن i شماره باس دارای اتصال‌کوتاه نیز هست.

$Z_{(2)ii}$: مقدار درایه‌ی i ام بر روی قطر ماتریس امپدانس مؤلفه‌ی منفی است که در آن i شماره باس دارای اتصال‌کوتاه نیز هست (این امپدانس شامل امپدانس شبکه و مبدل می‌باشد).

$Z_{(0)ii}$: مقدار درایه‌ی i ام بر روی قطر ماتریس امپدانس مؤلفه‌ی صفر است که در آن i شماره باس دارای اتصال‌کوتاه نیز هست.

$Z_{ij} = Z_{(1)ij}$: مقادیر امپدانس از ماتریس امپدانس مؤلفه‌ی مثبت است که در آن i شماره باس دارای اتصال‌کوتاه و j شماره‌ی باس‌هایی است که در آن یک منبع با مبدل کامل قرار گرفته است.

$I''_{k1maxPFO}$: بیشینه جریان اتصال‌کوتاهی که بدون تأثیر منابع تمام‌مبدلی در یک باس مشخص به دلیل حضور شبکه رخ می‌دهد

I''_{k1PF} : مجموع مشارکت منابع تمام‌مبدلی در جریان اتصال‌کوتاه باسبار هدف است.

مقادیر ماتریس Z با معکوس کردن $Ybus$ شبکه به دست خواهد آمد.

البته باید توجه داشت از نسخه‌های ۲۰۱۷ به بعد نرم‌افزارها توانایی محاسبه‌ی مشارکت واحدهای اینورتری در جریان اتصال‌کوتاه بر مبنای استاندارد IEC 60909-0 را داشته و می‌توان از محاسبات آن‌ها استفاده کرد. خروجی‌های مورد انتظار از مطالعات اتصال‌کوتاه

گزارش اتصال‌کوتاه بایستی موارد زیر را به عنوان خروجی ارائه دهد:

- ارائه‌ی سطح اتصال کوتاه تکفاز و سه‌فاز در باسبارهای تحت تأثیر پیش از اتصال نیروگاه فتوولتاییک مورد مطالعه
- ارائه‌ی سطح اتصال کوتاه تکفاز و سه‌فاز در باسبارهای تحت تأثیر پس از اتصال نیروگاه فتوولتاییک مورد مطالعه
- تعیین باسبارهای دارای سطح اتصال‌کوتاه بالاتر از قدرت قطع کلید ایستگاه‌های مربوط پس از ورود نیروگاه فتوولتاییک مورد مطالعه

۲-۶-۲- مطالعات پایداری

منابع فتوولتاییک با استفاده از اینورتر به شبکه متصل می‌شوند بنابراین در مطالعات پایداری مربوط به شبکه در حضور این مولدها، مدل‌سازی رفتار اینورتر و مجموعه‌ی کنترل‌ها و مشخصات آن‌ها بسیار ضروری است.

ارائه‌ی مدلی که بتوان بر مبنای آن در خصوص مطالعات پایداری شبکه و نیروگاه اظهارنظر کرد، یکی از مهم‌ترین موضوعات در حوزه‌ی پایداری است. مالک نیروگاه برای توضیح اثرات دینامیکی حضور واحد خود بر روی شبکه باید مدل دقیقی برای مطالعات پایداری در اختیار داشته باشد که این مدل یا بر مبنای مدل‌های استاندارد تدوین شده باشد و یا به روش‌های دیگری قابل صحت‌سنجی باشد[۲] .

۱-۲-۶-۲- فرضیات مطالعات پایداری

با توجه به اهمیت مطالعات پایداری با افزایش نفوذ منابع فتوولتاییک ضروری است تا به موارد اساسی توجه شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- مشخص کردن محل و ظرفیت دقیق سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر
- مشخص شدن ضریب خروج هم‌زمان نیروگاه‌های تجدیدپذیر برای مطالعات پایداری

- استفاده از یک مدل دقیق و قابل صحت‌سنجی برای منابع فتوولتاییک
- در اختیار داشتن اطلاعات سیستم‌های AVR و گاورنر نیروگاه‌های مرسوم

۲-۲-۶-۲- مدل‌سازی دینامیکی

مدل‌های دینامیکی باید در بستر نرم‌افزار تحلیل شبکه‌ی مورد استفاده، پیاده‌سازی و بررسی شده باشند. موضوع مهمی که بایستی به آن توجه داشت، این است که حضور نیروگاه‌های فتوولتاییک در کنار مولدهای مرسوم شبکه، می‌تواند اینرسی شبکه را دستخوش تغییر کند. از این رو علاوه بر مدل‌سازی دینامیکی واحدهای نیروگاهی مرسوم، بررسی و مدل‌سازی سایر نیروگاه‌های فتوولتاییک نیز ضروری است. به همین دلیل با توجه به ماهیت متفاوت واحدهای فتوولتاییک با واحدهای مرسوم، این مطالعات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۳-۲-۶-۲- انجام مطالعات پایداری

در مطالعات پایداری گذرا یک سیستم در شرایط بحرانی مختلفی قرار می‌گیرد و عملکرد شبکه در این شرایط بررسی می‌شود. در این مطالعات مهم‌ترین شرایط بحرانی در نظر گرفته شده عبارت‌اند از:

۱) ورود و خروج کل و درصد مشخصی(بسته به تعداد زیر مجموعه‌ها) از نیروگاه فتوولتاییک و بررسی شبکه
۲) اتصال‌کوتاه در پایانه‌ی نیروگاه مرسوم مجاور (یا نزدیک‌ترین نیروگاه مرسوم)
۳) اتصال‌کوتاه در خطوط متصل به نیروگاه فتوولتاییک و خطوط ارتباطی مهم منطقه
۴) اتصال‌کوتاه در پایانه‌ی نیروگاه فتوولتاییک
۵) در صورت وجود نیروگاه‌های تجدیدپذیر دیگری در نزدیکی نیروگاه مورد مطالعه اثر وجود این نیروگاه‌ها در این مطالعه مورد بررسی قرار گیرد و در صورت نیاز، ورود و خروج کل یا بخشی از این واحدها (با توجه به ضریب خروج همزمان این نیروگاه‌ها) در این مطالعه مد نظر قرار گیرد.

در این سناریوها زاویه رتور نیروگاه‌های مجاور یا نزدیک‌ترین نیروگاه‌های مرسوم باید بررسی گردد.

در هر یک از حالتهای فوق لازم است شینه‌های متاثر از شرایط بحرانی از دیدگاه ولتاژ دینامیکی مورد بررسی قرار گیرند تا در محدوده مجاز مشخص شده توسط بهره‌بردار شبکه(گرید کد) باشند. در این حالت لازم است میزان و نحوه مشارکت نیروگاه فتوولتائیک مورد مطالعه در تامین توان راکتیو مورد نیاز شبکه محلی و کنترل ولتاژ شینه‌های شبکه مشخص گردد. همچنین در سناریوهای خروج یکباره نیروگاه فتوولتاییک و یا خروج سایر نیروگاه‌های تجدیدپذیر منطقه ناشی از عدم قطعیت تولید این واحدها، مطالعات پایداری ولتاژ بایستی انجام شود.

۳-۶-۲- مطالعات حفاظتی

در این مطالعه لازم است موارد ذیل ارائه و مورد شبیه‌سازی و ارزیابی قرار گیرد:

- ارائه دیاگرام تک خطی حفاظتی برای ۱- نیروگاه ۲- باس نیروگاه ۳- خط یا خطوط اتصال نیروگاه به شبکه
- حفاظت ایستگاه بالادستی
- حفاظت نیروگاه در محل اتصال
- بررسی عملکرد حفاظت‌های هماهنگ شونده‌ی جریانی

۴-۶-۲- مطالعات کیفیت توان

منابع فتوولتاییک با استفاده از مبدل به شبکه متصل می‌شوند. یکی از مهم‌ترین نکاتی که در خصوص مبدل‌ها و عملکرد آن‌ها وجود دارد، کلیدزنی مربوط به آن‌هاست. این موضوع سبب تولید و تزریق هارمونیک جریان به شبکه می‌شود. به این ترتیب این منابع از منابع مرسوم هارمونیک‌های پرتعدادتر و بیشتری تولید می‌کنند و از این جهت می‌توانند، در صورتی که در شبکه ضریب نفوذ قابل توجهی داشته باشند، شبکه را نیز متأثر از خود بگردانند و آن را دچار آلودگی هارمونیکی بنمایند.

۱-۴-۶-۲- فرضیات مطالعات کیفیت توان

یک مولد دارای مبدل، ممکن است جریان هارمونیکی قابل توجهی به شبکه تزریق کند. از این جهت بایستی میزان تزریق هارمونیک این مولدها محدوده‌ی مشخصی را رعایت نماید. محدودیت‌های تزریق جریان هارمونیکی و همچنین سطوح ولتاژ هارمونیکی بر مبنای استاندارد صنعت برق ایران، "*مشخصات و خصوصیات انرژی الکتریکی(کیفیت برق)*" ارائه شده است.

جدول ۲-۵: حدود مجاز اعوجاج جریان در سطح ولتاژ ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت

ماکزیمم اعوجاج جریان مجاز به درصد نسبت به ماکزیمم جریان تولیدی بدون هارمونیک نیروگاه											
درصد ماکزیمم جریان تولیدی بدون هارمونیک نیروگاه به جریان اتصال‌کوتاه محل تغذیه (R)	**اعوجاج تکی جریان هر هارمونیک مرتبه n**										اعوجاج کلی جریان
	n<11		۱۱<n<17		۱۷<n<23		۲۳<n<35		n>35		
	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	
R>5	۲,۰	۰,۵	۱,۰	۰,۲	۰,۷	۰,۲	۰,۳	۰,۱	۰,۱	۰,۰	۲,۵
۵>R>2	۳,۵	۰,۹	۱,۷	۰,۴	۱,۲	۰,۳	۰,۵	۰,۱	۰,۲	۰,۰	۴
۲>R>1	۵,۰	۱,۲	۲,۲	۰,۶	۲,۰	۰,۵	۰,۷	۰,۲	۰,۳	۰,۱	۶,۰
۱>R>0.1	۶,۰	۱,۵	۲,۷	۰,۷	۲,۵	۰,۶	۱,۰	۰,۲	۰,۵	۰,۱	۷,۵
R<0.1	۷,۵	۱,۹	۳,۵	۰,۹	۳,۰	۰,۷	۱,۲	۰,۳	۰,۷	۰,۲	۱۰

جدول ۲-۶: حدود مجاز اعوجاج جریان در سطح ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت

ماکزیمم اعوجاج جریان مجاز به درصد نسبت به ماکزیمم جریان تولیدی بدون هارمونیک نیروگاه											
درصد ماکزیمم جریان تولیدی بدون هارمونیک نیروگاه به جریان اتصال‌کوتاه محل تغذیه (R)	اعوجاج تکی جریان هر هارمونیک مرتبه n										اعوجاج کلی جریان
	n<11		۱۱<n<17		۱۷<n<23		۲۳<n<35		n>35		
	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	فرد	زوج	
R>2	۲,۰	۰,۵	۱,۰	۰,۲	۰,۷	۰,۲	۰,۳	۰,۱	۰,۱	۰,۰۴	۲,۵
R<2	۳,۰	۰,۷	۱,۵	۰,۴	۱,۱	۰,۳	۰,۴	۰,۱	۰,۲	۰,۰۵	۴

باید بیان داشت که منظور از R مقدار به دست آمده از رابطه‌ی زیر است:

$$R = \frac{I_l}{I_{sc}} \times ۱۰۰$$

که منظور از I_l بیشینه جریان تولیدی و I_{sc} جریان اتصال‌کوتاه در محل مورد نظر است.

همچنین استاندارد هارمونیکی وضعیت مناسب ولتاژ را نیز از جهت هارمونیکی تعیین نموده که در جدول ۲-۷: حدود مجاز هارمونیک ولتاژ در شبکه ارائه شده است.

جدول ۲-۷: حدود مجاز هارمونیک ولتاژ در شبکه

حداکثر هارمونیک ولتاژ مجاز در شینه‌های با ولتاژهای مختلف به درصد نسبت به ولتاژ نامی با فرکانس ۵۰ هرتز			
ولتاژ شینه	اعوجاج تکی ولتاژ		اعوجاج کل ولتاژ (THD)
	فرد	زوج	
۴۰۰ ولت، ۲۰ و ۳۳ کیلوولت	۳	۱,۵	۵
۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت	۱,۵	۰,۷	۲,۵
۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت	۱	۰,۵	۱,۵

۲-۴-۶-۲- اطلاعات مورد نیاز در مطالعات کیفیت توان و انجام مطالعات

یک شبکه باید پیش از ورود منابع فتوولتاییک، مورد پایش هارمونیکی قرار بگیرد تا ظرفیت‌ها و محدودیت‌های یک شبکه بر این مبنا شناسایی شود.

پس از ارزیابی بایستی داده‌های ارزیابی هارمونیکی با دقت مناسب در اختیار نیروگاه‌های جدید قرار بگیرد تا با مدل‌سازی شبکه پیش از ورود منابع جدید و پس از ورود آن به مطالعه‌ی هارمونیکی اثرات ورود منابع خود بپردازند.

اطلاعات مورد نیاز در مطالعات کیفیت توان عبارت‌اند از:

- دک مطالعات هارمونیکی

- اطلاعات جریان تزریقی هارمونیکی سایر منابع تجدیدپذیر به تفکیک
- اطلاعات هارمونیک جریان تزریقی به تفکیک در ظرفیت‌های مختلف منبع (از ۰٫۱ پریونیت تا ۱پریونیت)

با این اطلاعات بایستی پخش‌بار هارمونیکی شبکه بررسی شود تا وضعیت هارمونیکی شبکه روشن شود. خروجی این مطالعات بایستی شامل گزارش کامل وضعیت هارمونیکی ولتاژ شینه‌های مختلف شبکه باشد.

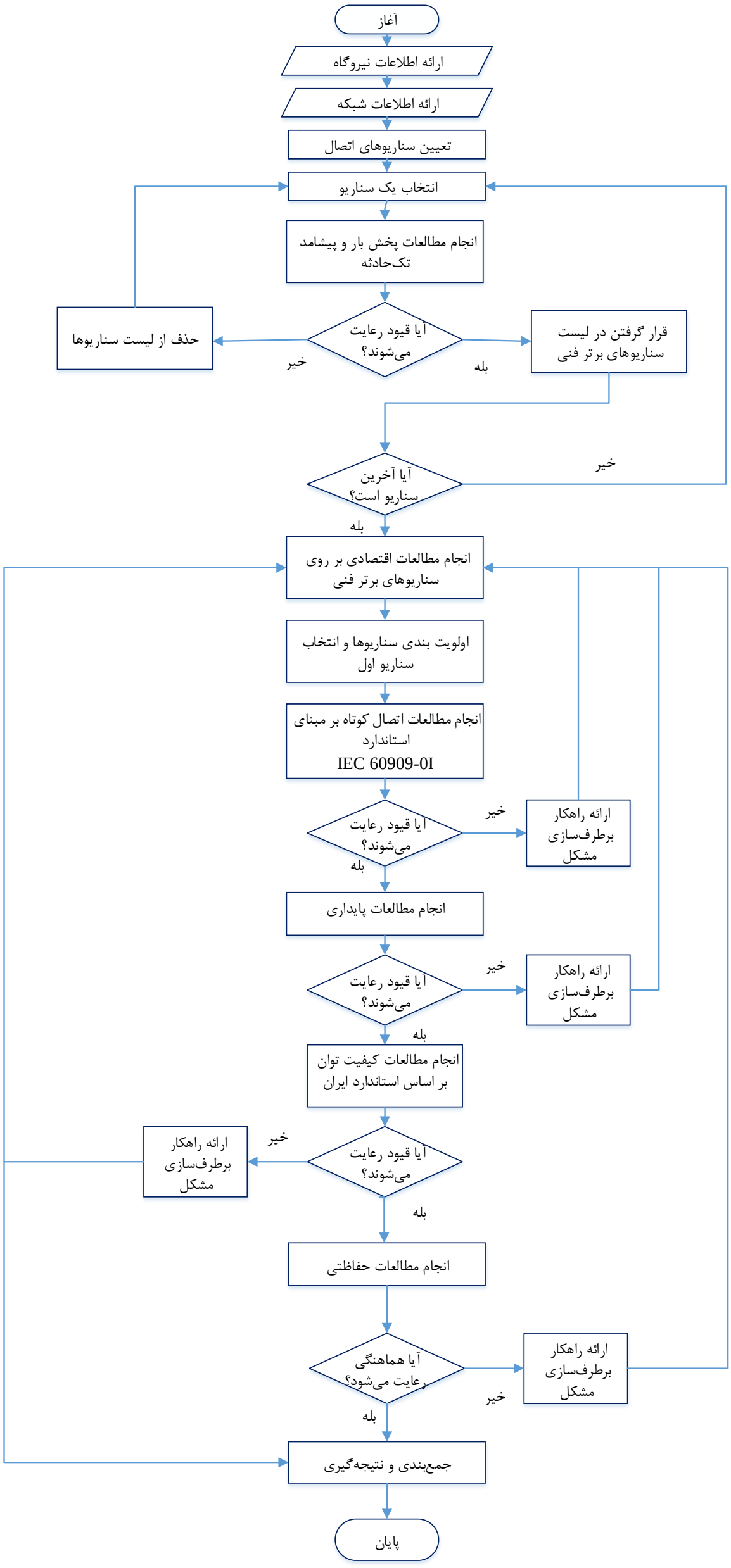
سایر مباحث کیفیت توانی نظیر عدم تعادل ولتاژ و فلیکر در چنین نیروگاه‌هایی موضوعیتی ندارد و بایستی پس از اجرای طرح با اندازه‌گیری در خصوص آن اظهارنظر کرد.

جمع‌بندی نهایی

در انتهای مطالعات نتایج به دست آمده از بخش‌های مختلف بایستی جمع‌بندی و ارائه گردد. این جمع‌بندی باید شامل نتایج به دست آمده در تمامی بخش‌ها باشد. مهم‌ترین مواردی که بایستی در این بخش ارائه گردد عبارت‌اند از:

- گزینه‌های انتخابی
- گزینه‌های حذف شده در نتیجه‌ی مطالعات پخش‌بار و پیشامد تک‌حادثه
- انتخاب گزینه برتر و بیان چگونگی این انتخاب
- خلاصه‌ای از نتایج مطالعات تکمیلی (اتصال‌کوتاه، پایداری و کیفیت توان)

در ادامه روندنمای کلی انجام مطالعات نیزآورده شده است.


آغاز
ارائه اطلاعات نیروگاه
ارائه اطلاعات شبکه
تعیین سناریوهای اتصال
انتخاب یک سناریو
انجام مطالعات پخش بار و پیشامد تک‌حادثه
آیا قیود رعایت می‌شوند؟
خیر
حذف از لیست سناریوها
بله
قرار گرفتن در لیست سناریوهای برتر فنی
آیا آخرین سناریو است؟
خیر
بله
انجام مطالعات اقتصادی بر روی سناریوهای برتر فنی
اولویت بندی سناریوها و انتخاب سناریو اول
انجام مطالعات اتصال کوتاه بر مبنای استاندارد IEC 60909-0I
آیا قیود رعایت می‌شوند؟
خیر
ارائه راهکار برطرف‌سازی مشکل
بله
انجام مطالعات پایداری
آیا قیود رعایت می‌شوند؟
خیر
ارائه راهکار برطرف‌سازی مشکل
بله
انجام مطالعات کیفیت توان بر اساس استاندارد ایران
آیا قیود رعایت می‌شوند؟
خیر
ارائه راهکار برطرف‌سازی مشکل
بله
انجام مطالعات حفاظتی
آیا هماهنگی رعایت می‌شود؟
خیر
ارائه راهکار برطرف‌سازی مشکل
بله
جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
پایان

مراجع

[2] http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=3030

[3] Ellis, Abraham, Michael Behnke, and Ryan Elliott. Generic Solar Photovoltaic System Dynamic Simulation Model Specification. No. SAND2013--8876. Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2013.

[4] EPIA, "Global market outlook for Photovoltaics 2014-2018," European Photovoltaic Industry Association, Tech. ep., 2014. [Online]. Available: http://www.epia.org/

[5] S. Eftekharnejad, V. Vittal, B. Keel, and J. Loehr, "Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 893–901, may 2013. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6331592

[6] A. Cabrera-Tobar, E. Bullich-Massague, M. Arag´ u¨es-Pe´ nalba, and˜ O. Gomis-Bellmunt, "Review of advanced grid requirements for the integration of large scale photovoltaic power plants in the transmission system," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 62, pp. 971–987, sep 2016. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211630154X

[7] Antonios Marinopoulos, Fabio Papandrea, Muhamad Reza, Staffan Norrga, Filippo Spertino, and Roberto apoli. *Grid Integration Aspects of Large Solar PV Installations: LVRT Capability and Reactive power/Voltage support equirements*. 2011 IEEE Trondheim PowerTech.

[8] T. García-Sánchez1, E. Gómez-Lázaro1 and A. Molina-García. A Review and Discussion of the Grid-Code Requirements for Renewable Energy Sources in Spain. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14), Cordoba (Spain), ISSN 2172-038 X, No.12, April 2014

[9] S. Achilles, S. Schramm, and J. Bebic GE Global Research Niskayuna, New York. Transmission System erformance Analysis for High-Penetration Photovoltaics. NREL/SR-581-42300 February 2008.

[10] IEEE Std 519™-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power systems.