





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم‌های توزیع با حضور منابع تولید توان خورشیدی

دانشجو: مجید غفاریان فر

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر امین حاجی زاده

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

آذر ۹۴

ب

شماره: ۸۳/آ.ت.ب
تاریخ: ۹۴/۰۹/۲۳
ویرایش: —

بسمه تعالی



فرم صورت جلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم آقای: مجید غفاریان فر
به شماره دانشجویی: ۹۲۱۰۴۱۴ رشته: مهندسی برق قدرت گرایش: ماشینهای الکتریکی

تحت عنوان: تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم های توزیع با حضور منابع تولید توان خورشیدی

که در تاریخ ۹۴/۰۹/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: عالی) (۱۹/۹۹)
--------------------------------	------------------------------------	--

۱- عالی (۱۹ - ۲۰) ✓

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	—	—	—
۲- استاد مشاور	—	—	—
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مرتضی رحیمی	استاد	
۴- استاد امتحن	حسن اصیل	استاد	
۵- استاد امتحن	محمد حبیبزاد	استاد	



رئیس دانشکده:

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم...

مشکو و قدردانی

ای نام تو بہترین سرآغاز
بی نام تو نامہ کی کنم باز

خداوند را بسیار شاکرم کہ لطفش را در ہمہ ہی مراحل زندگی، شامل عالم نمود. جا دارد از

زحمات بی دریغ استاد بزرگوارم، استاد اخلاق و دانش آقای دکتر امین حاجی زاده کہ

راہ علم و دانش را، همچون چراغی بر من روشن نمودند، مشکرو سپاسگذاری نمایم.

تعهد نامه

اینجانب ...مجید غفاریان فر... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-قدرت دانشکده برق دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه...تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم‌های توزیع با حضور منابع تولید توان خورشیدی... تحت راهنمایی دکتر امین حاجی زاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

۱۳۹۴/۰۹/۲۳
مجید غفاریان

تاریخ:

امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

با توجه به آلاینده‌گی منابع فسیلی برای تولید برق توسط نیروگاه‌های بخار و گازی، علاقه به استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر و پاک در برنامه‌های تأمین انرژی برق کشورها قابل مشاهده است. در شبکه‌های توزیع فعال، بهبود و افزایش قابلیت بارگذاری قبل از رسیدن به فروپاشی ولتاژ به عنوان یکی از معیارهای مهم برای تعیین سطح نفوذ واحدهای تولید پراکنده (DG^1) در شبکه است. ویژگی‌هایی مانند نسبت بالای R/X خطوط و حضور گسترده صفحات خورشیدی (PV^2) به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های تجدید پذیر، مطالعات وسیعی را برای بررسی مسائل پیش رو و تأثیرگذار بر شبکه‌های توزیع می‌طلبد. حوادثی که تاکنون منجر به فروپاشی ولتاژ شبکه قدرت شده‌اند، ما را مجاب به مطالعه پایداری ولتاژ³ شبکه قبل از استفاده گسترده از این منابع می‌نماید. هدف این پایان‌نامه، تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات با وجود ادغام PV به شبکه‌های توزیع برق است و از دو روش برای بررسی پایداری ولتاژ استفاده می‌شود. ابتدا از یک شاخص پایداری ولتاژ و سپس از روش رسم منحنی ولتاژ-توان، تأثیر PV بر پایداری و تلفات سیستم توزیع مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این پایان‌نامه با استفاده از یک راهکار کاربردی، تحلیل پایداری ولتاژ با تعریف ضریب نفوذ برای PV ارائه شده است و این ایده بر روی سیستم شعاعی توزیع برق ۳۴ گره IEEE با سطوح ولتاژ ۲۴/۹ و ۴/۱۶ کیلوولت پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که راهکار مطرح شده در این پایان‌نامه توانسته است که بر اساس ویژگی‌های مطرح‌شده در تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات، اثرات مثبت و منفی حضور PV در شبکه‌های توزیع برق را نشان دهد.

کلمات کلیدی: شاخص پایداری ولتاژ، شبکه توزیع برق، صفحات خورشیدی، قابلیت بارگذاری، نفوذ.

¹ Distributed Generation

² Photovoltaic

³ Voltage Stability

مقالات چاپ شده:

۱- مجید غفاریان فر، امین حاجی زاده "تحلیل نامتعادلی سیستم‌های توزیع در حضور منابع خورشیدی تک فاز با در نظر گرفتن قید پایداری ولتاژ" سومین کنفرانس منطقه‌ای سیرد،

تهران، دی ماه ۱۳۹۳

2- **Majid Ghaffarianfar, Amin Hajizadeh, Mohammad Kazeminejad** "Impact of High Photovoltaic Penetrations on Voltage Stability and Power Losses in Power Distribution Systems, **2nd International Conference and Exhibition on Solar Energy (ICESE), University of Tehran, 2015.**

فهرست عناوین

۱ فصل اول	۱
۱-۱ مقدمه:.....	۲
۲-۱ زیرساخت‌های فعلی شبکه برق و معرفی شبکه‌های هوشمند	۲
۳-۱ شبکه‌های توزیع فعال	۳
۴-۱ ضرورت انجام تحقیق	۶
۵-۱ اهداف پژوهش	۷
۲ فصل دوم	۹
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ اهمیت پایداری سیستم قدرت	۱۰
۳-۲ انواع ناپایداری ولتاژ	۱۱
۱-۳-۲ ناپایداری کوتاه‌مدت	۱۱
۲-۳-۲ ناپایداری میان‌مدت	۱۲
۳-۳-۲ ناپایداری بلندمدت	۱۲
۴-۲ مروری بر چند حادثه ناپایداری ولتاژ	۱۳
۵-۲ هدف بررسی و تحلیل پایداری ولتاژ	۱۴
۱-۵-۲ روش‌های کلی تحلیل پایداری ولتاژ	۱۴
۱-۱-۵-۲ روش‌های دینامیکی	۱۵
۲-۱-۵-۲ روش‌های استاتیکی	۱۵

۶-۲	بررسی پایداری ولتاژ با استفاده از منحنی V-P	۱۵
۷-۲	رسم منحنی V-P در یک گره مشخص	۱۹
۸-۲	مروری بر شاخص‌های پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع برق	۲۱
۱-۸-۲	شاخص پایداری ولتاژ Chakravorty	۲۳
۲-۸-۲	شاخص پایداری ولتاژ Jasmon	۲۵
۳-۸-۲	شاخص PSI	۲۶
۴-۸-۲	شاخص پایداری ولتاژ Guiping برای بارهای امپدانس ثابت	۲۷
۹-۲	وابستگی بار به ولتاژ در سیستم توزیع	۲۷
۱-۹-۲	مدل بار به صورت نمایی	۲۸
۱۰-۲	جمع‌بندی	۳۲
۳	فصل سوم	۳۵
۱-۳	مقدمه	۳۶
۲-۳	مدار معادل صفحات خورشیدی	۳۸
۳-۳	تأثیر تغییرات تابش بر منحنی مشخصه PV	۳۹
۴-۳	روش‌های به‌کارگیری از صفحات خورشیدی	۴۲
۱-۴-۳	متصل به شبکه سراسری برق	۴۲
۲-۴-۳	مستقل از شبکه سراسری برق	۴۳
۵-۳	اثر افت توان PV بر شبکه توزیع	۴۴
۶-۳	شبیه‌سازی دو نمونه افت توان PV و اثر آن بر ولتاژ شبکه توزیع	۴۵
۷-۳	محدودیت توانایی در تحویل توان	۵۰

۵۳	۸-۳ شاخص پایداری ولتاژ
۵۵	۱-۸-۳ تعریف مقدار نفوذ PV
۵۸	۹-۳ تأثیر نفوذ PV بر ولتاژ شبکه‌های توزیع
۶۲	۱۰-۳ نامتعادلی سیستم‌های توزیع
۶۳	۱-۱۰-۳ شاخص نامتعادلی
۶۳	۱۱-۳ جمع‌بندی
۶۵	۴ فصل چهارم
۶۶	۱-۴ مقدمه
۶۶	۲-۴ انتخاب سیستم توزیع جهت تحلیل وضعیت پایداری
۶۷	۳-۴ شبیه‌سازی سیستم ۳۴ گره IEEE در دیگسایلنت
۷۲	۴-۴ تحلیل وضعیت پایداری ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE
۷۳	۱-۴-۴ استفاده از شاخص پایداری ولتاژ
۸۰	۲-۴-۴ محاسبه شاخص پایداری ولتاژ با لحاظ توان موهومی PV
۸۱	۳-۴-۴ استفاده از منحنی‌های V-P
۸۴	۴-۴-۴ تأثیر افت توان PV طی یک شبانه‌روز بر پایداری ولتاژ گره ۸۹۰
۸۷	۵-۴ تلفات
۸۷	۱-۵-۴ تلفات سیستم ۳۴ گره با نصب PV در گره ۸۹۰
۹۰	۶-۴ محاسبه شاخص نامتعادلی
۹۳	۷-۴ جمع‌بندی
۹۵	۵ فصل پنجم

۹۶ ۱-۵ نتیجه گیری

۹۷ ۲-۵ پیشنهادها

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): فناوری‌های موجود در سیستم‌های توزیع آینده [۳] ۴
- شکل (۲-۱): سه فن‌آوری مهم منابع تجدید پذیر [۴] ۵
- شکل (۱-۲): شبکه دو گره نمونه ۱۶
- شکل (۲-۲): منحنی ولتاژ-توان به ازای ضریب توانهای مختلف ۱۹
- شکل (۳-۲): مدل تک‌خطی شبکه توزیع شعاعی مورد مطالعه در [۱۹] ۲۳
- شکل (۴-۲): یک شاخه نمونه از شبکه توزیع شعاعی [۱۹] ۲۴
- شکل (۵-۲): مدل تک‌خطی سیستم توزیع در [۱۸] ۲۵
- شکل (۶-۲): شبکه دو گره نمونه، استفاده از DG برای تولید توان حقیقی در سمت بار [۲۱] ۲۶
- شکل (۷-۲): دیاگرام فازوری بهره‌برداری از DG به صورت تولید توان حقیقی در [۲۱] ۲۷
- شکل (۸-۲): ولتاژ بر حسب تقاضای بار (z) برای مدل‌های مختلف بار نمایی [۱۲] ۳۱
- شکل (۱-۳): بهره‌مندی نواحی مختلف کره زمین از تابش خورشید [۴] ۳۶
- شکل (۲-۳): اطلس تابش خورشیدی ایران [۲۳] ۳۷
- شکل (۳-۳): ظرفیت نصب‌شده صفحات خورشیدی از سال ۱۹۹۲ میلادی تاکنون [۲۴] ۳۷
- شکل (۴-۳): قیمت صفحات خورشیدی سیلیکونی به ازای هر وات تاکنون [۲۴] ۳۸
- شکل (۵-۳): اجزای تشکیل‌دهنده یک آرایه خورشیدی [۲۵] ۳۹
- شکل (۶-۳): مدار معادل PV ۳۹
- شکل (۷-۳): اثر تغییر تابش بر مشخصه توان-ولتاژ صفحه خورشیدی MSX-60 ۴۰

- شکل (۳-۸): ادغام توان PV به شبکه از طریق ردیابی حداکثر توان (مبدل جریان مستقیم) و اینورتر [۲۸] ۴۱
- شکل (۳-۹): ادغام توان PV به شبکه فقط از طریق اینورتر [۲۹] ۴۱
- شکل (۳-۱۰): سیستم PV متصل به شبکه سراسری برق [۳۱] ۴۳
- شکل (۳-۱۱): سیستم PV متصل به بار [۳۱] ۴۳
- شکل (۳-۱۲): تغییر توان PV بر اثر افت تابش در مرجع [۹] ۴۵
- شکل (۳-۱۳): شبکه دو گره نمونه با ادغام PV ۴۵
- شکل (۳-۱۴): تغییر نرم تابش بر اثر ابری شدن آسمان ۴۶
- شکل (۳-۱۵): تغییر سریع تابش بر اثر ابری شدن آسمان ۴۶
- شکل (۳-۱۶): ولتاژ خط به خط اینورتر سه سطحی متصل به PV ۴۷
- شکل (۳-۱۷): عملکرد واپاشگر تثبیت ولتاژ در ورودی اینورتر PV ۴۷
- شکل (۳-۱۸): نسبت زمان وظیفه به زمان دوره برای ردیابی حداکثر توان در مبدل جریان مستقیم ۴۸
- شکل (۳-۱۹): افت توان ردیابی از PV بر اثر افت تابش ۴۸
- شکل (۳-۲۰): ولتاژ گره سمت بار (V_r) با افت توان PV در نفوذ ۴۰٪ ۴۹
- شکل (۳-۲۱): مدار معادل سیستم دو گره ۵۱
- شکل (۳-۲۲): منحنی قابلیت بارگذاری و ولتاژ سمت دریافت کننده ۵۳
- شکل (۳-۲۳): سیستم توزیع معادل در حضور PV ۵۶
- شکل (۳-۲۴): تأثیر نفوذهای مختلف PV بر وضعیت پروفایل ولتاژ شبکه [۴۰] ۵۹
- شکل (۳-۲۵): تأثیر نفوذهای مختلف PV بر ولتاژ گره ۶۳۴ از شبکه مورد استفاده در [۴۱] طی یک

شبانه‌روز	۵۹
شکل (۳-۲۶): تغییر توان PV در نفوذهای مختلف طی یک شبانه‌روز [۴۱]	۶۰
شکل (۳-۲۷): توان تولیدی PV بر حسب واحد، طی شبانه‌روز و تقاضای بار در [۴۳]	۶۱
شکل (۳-۲۸): مدل پیشنهادی برای PV طی مدت زمان یک شبانه‌روز	۶۲
شکل (۴-۱): شبکه توزیع ۳۴ گره IEEE [۴۶]	۶۶
شکل (۴-۲): شبیه‌سازی سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE در محیط DIgSILENT	۶۸
شکل (۴-۳): شیوه انجام تنظیمات بار در DIgSILENT	۶۸
شکل (۴-۴): پارامترهای یک نمونه از مدل‌های خط، در DIgSILENT	۶۹
شکل (۴-۵): تنظیمات سربرگ پخش بار در DIgSILENT	۶۹
شکل (۴-۶): پروفایل ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE بر مبنای طول فیدر	۷۱
شکل (۴-۷): انشعاب‌های تک فاز در سیستم ۳۴ گره IEEE	۷۱
شکل (۴-۸): پروفایل ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE بر اساس شماره گره‌ها	۷۲
شکل (۴-۹): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE بدون PV	۷۳
شکل (۴-۱۰): تاثیر کاهش پروفایل بار کل سیستم بر پایداری ولتاژ طبق شاخص پایداری ولتاژ L_k	۷۵
شکل (۴-۱۱): تاثیر افزایش پروفایل بار کل سیستم بر پایداری ولتاژ طبق شاخص پایداری ولتاژ L_k	۷۵
شکل (۴-۱۲): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۹۰	۷۶
شکل (۴-۱۳): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۲۰	۷۶
.....	۷۷
.....	۸۲۲

- شکل (۴-۱۴): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۳۰
 ۷۷.....
- شکل (۴-۱۵): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۲۴
 ۷۸.....
- شکل (۴-۱۶): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۰۸
 ۷۸.....
- شکل (۴-۱۷): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با ضریب توان‌های مختلف PV در
 گره ۸۹۰..... ۸۰
- شکل (۴-۱۸): منحنی‌های V-P در گره‌های نزدیک به گره مرجع سیستم ۳۴ گره IEEE..... ۸۱
- شکل (۴-۱۹): منحنی‌های V-P در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری طبق شاخص پایداری ولتاژ..... ۸۲
- شکل (۴-۲۰): منحنی‌های V-P در گره‌های انتهایی سیستم ۳۴ گره IEEE..... ۸۲
- شکل (۴-۲۱): منحنی‌های V-P در گره‌های تک فاز سیستم ۳۴ گره IEEE..... ۸۳
- شکل (۴-۲۲): مقدار شاخص پایداری L_k مربوط به فاز A گره ۸۹۰ در نفوذهای مختلف PV..... ۸۵
- شکل (۴-۲۳): مقدار شاخص پایداری L_k مربوط به فاز B گره ۸۹۰ در نفوذهای مختلف PV..... ۸۵
- شکل (۴-۲۴): مقدار شاخص پایداری L_k مربوط به فاز C گره ۸۹۰ در نفوذهای مختلف PV..... ۸۶
- شکل (۴-۲۵): تلفات سیستم ۳۴ گره با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۹۰..... ۸۸
- شکل (۴-۲۶): پروفایل ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE با نصب ۴۰٪ PV در گره ۸۹۰..... ۸۹
- شکل (۴-۲۷): توالی‌های ولتاژ در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری در سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE..... ۹۰
- شکل (۴-۲۸): توالی منفی ولتاژ در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری در سیستم ۳۴ گره IEEE..... ۹۱
- شکل (۴-۲۹): توالی‌های ولتاژ در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری با ۴۰٪ نفوذ تک فاز PV در فاز A گره

۹۲ ۸۹۰

شکل (۴-۳۰): توالی منفی ولتاژ در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری با ۴۰٪ نفوذ تک فاز PV در فاز A گره

۹۳ ۸۹۰

فهرست جداول

- جدول (۱-۲): نماهای کسری α و β برای برخی از بارها ۳۰
- جدول (۱-۳): اطلاعات بار شبکه نمونه شکل (۳-۲۳) ۵۶
- جدول (۲-۳): وضعیت پایداری ولتاژ با و بدون حضور PV در فاز A ۵۷
- جدول (۳-۳): وضعیت پایداری ولتاژ با و بدون حضور PV در فاز B ۵۷
- جدول (۴-۳): وضعیت پایداری ولتاژ با و بدون حضور PV در فاز C ۵۷
- جدول (۱-۴): مقدار شاخص نامتعادلی گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری در سیستم ۳۴ گره IEEE ۹۱

فهرست علائم و نشانه‌ها

امپدانس خط	Z
توان حقیقی	P
توان موهومی	Q
جریان	I
ولتاژ سمت گیرنده	V_r
مقاومت خط	R_s
اندوکتانس خط	X_s

۱ فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه:

شبکه توزیع الکتریکی شامل بخشی از شبکه‌ی برق است که انرژی الکتریکی را از شبکه انتقال دریافت نموده و به مصرف‌کننده تحویل می‌دهد. برای نیاز مصرف‌کننده‌های برق در شهرها، حومه شهرها و نواحی دوردست از طریق اتصال به شبکه‌های توزیع از انرژی الکتریکی بهره‌برداری می‌شود. عوامل متعددی نظیر توسعه و پیشرفت در فن‌آوری‌های تولید پراکنده^۱، محدودیت در ساختار خطوط انتقال جدید، افزایش تقاضای مشتریان جهت قابلیت اطمینان^۲ بیشتر در تولید برق، بازار برق^۳ و مواردی از این قبیل، تأثیر وجود تولید پراکنده بر سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی را نشان می‌دهد. از سایر ویژگی‌های سیستم توزیع، می‌توان به وسعت کوچک جغرافیایی آن‌ها نسبت به شبکه انتقال و تجمع مصرف‌کنندگان توان در آن اشاره نمود که از این ویژگی برای اعمال تقریب‌های موردنظر در طی شبیه‌سازی مسئله استفاده خواهد شد.

۱-۲ زیرساخت‌های فعلی شبکه برق و معرفی شبکه‌های هوشمند^۴

زیرساخت‌های شبکه برق را به‌طور کلی می‌توان به چهار دسته تولید، انتقال، توزیع و بهره‌برداری از سه دسته نخست تقسیم کرد. در هر یک از این دسته‌ها، تغییرات قابل توجهی در حال جریان و یا در مرحله پیشنهاد قرار دارند. بسیاری از این تغییرات پتانسیل آن را دارند که بر روی طراحی، برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت در مناطق وسیعی از سیستم تأثیر بگذارند. یکی از بزرگ‌ترین برنامه‌ها در همه این بخش‌ها ابتکار عمل در هوشمند سازی شبکه برق است. برنامه‌ای که در وزارت انرژی ایالات متحده (DOE)^۵ برای شبکه‌های مدرن وجود دارد، از برنامه‌های برجسته‌ای است که به نوسازی و

¹ Distributed generation

² Reliability

³ Power market

⁴ Smart Grid

⁵ United States Department of Energy

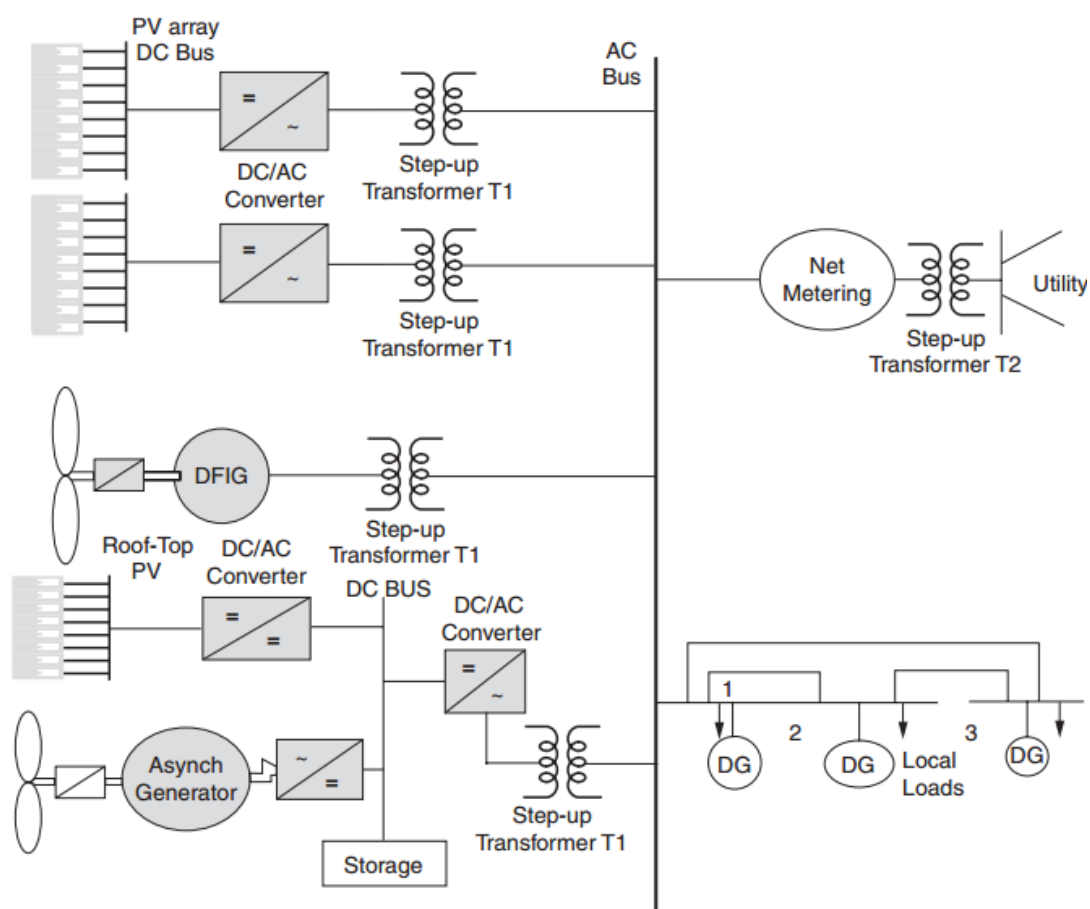
تحول در زیرساخت شبکه برق می‌پردازد [۱]. برخی از مهم‌ترین اقدامات لازم در این برنامه به شرح زیر هستند:

۱. قادرسازی مشارکت فعال مصرف‌کنندگان در پاسخ به تقاضا
۲. بهبود کیفیت برق برای نیازهای عصر حاضر
۳. تطبیق سطح کل تولید با مقدار ذخیره‌سازی
۴. فعال کردن محصولات متنوع، خدمات و بازار برق
۵. بهینه‌سازی موجودی‌ها و عملکرد مؤثر
۶. قابلیت بهبود بهتر در برابر حوادث

۳-۱ شبکه‌های توزیع فعال

در شبکه‌های توزیع غیرفعال، انتقال برق به‌طور یک‌طرفه به سمت مصرف‌کننده است. در حال حاضر، با ایجاد تحولی بزرگ در شبکه‌های توزیع برق و انتقال دوطرفه برق، شبکه‌های توزیع به یک بخش بزرگ فعال در صنعت برق تبدیل شده است. بدون وجود هرگونه واحد DG در شبکه‌های توزیع، تأمین و عرضه برق مورد نیاز مشتریان در شبکه توزیع توسط شبکه اصلی به‌صورت یک‌طرفه انجام می‌شود. شکل (۱-۱) نمایی کلی از تجمع فناوری‌های پدید آمده، الکترونیک قدرت و کنترل در سیستم‌های توزیع فعال در آینده نزدیک را نشان می‌دهد. حضور واحدهای DG در سیستم توزیع منجر به انتقال برق به‌طور دوطرفه در شبکه می‌شود و این مهم یکی از دلایلی است که کشورهای در حال توسعه باید در توسعه زیرساخت‌های صنعت توزیع برق توجه ویژه‌ای به این موضوع داشته باشند. این در حالی است که در کشورهای توسعه‌یافته باید به چالش فنی و اقتصادی پیش روی موضوع انتقال برق از شبکه‌های توزیع به دیگر نقاط شبکه توجه شود. بنابراین شبکه‌های توزیع فعال نیاز به ترکیبی از سیستم‌های کنترل

انعطاف‌پذیر و هوشمند سازی دارد. دفتر بازار گاز و برق (OFGEM)^۱، این چالش را در کشور بریتانیا به عنوان "سیم‌کشی مجدد بریتانیا" نام‌گذاری کرده است. به‌منظور بهره‌برداری از انرژی منابع تجدید پذیر، شبکه‌های توزیع فعال^۲ نیز باید فن‌آوری‌های هوشمند سازی شبکه توزیع را در دستور کار خود قرار دهند [۲]. همان‌طور که شکل (۱-۱) نشان می‌دهد، در سیستم‌های توزیع برق آینده باید شرایط حضور و استفاده گسترده از DG، ادوات الکترونیک قدرت، جبران‌سازها، ذخیره‌سازهای انرژی و ابزارهای اندازه‌گیری هوشمند فراهم گردد.



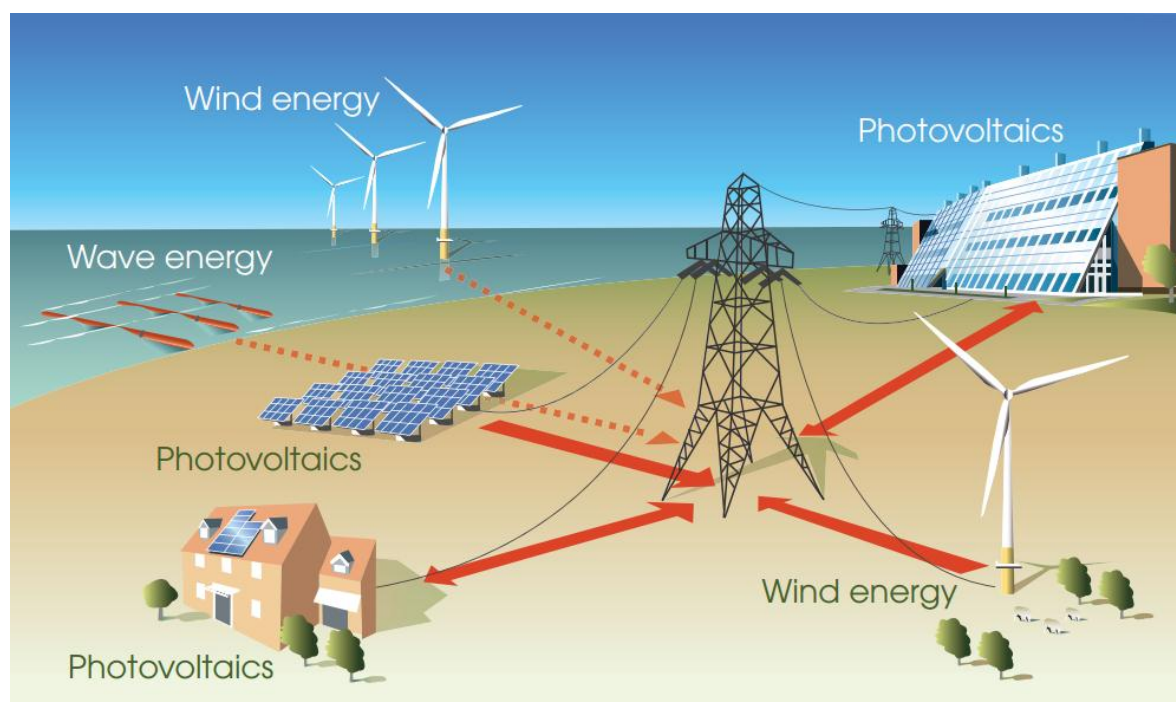
شکل (۱-۱): فناوری‌های موجود در سیستم‌های توزیع آینده [۳]

¹ Office of Gas and Electricity Markets

² Active Distribution Networks

بهره‌برداری از DG در شبکه توزیع فعال، نیاز به ترکیبی از مدیریت مناسب و یکپارچه‌سازی DG در شبکه‌های توزیع و مدیریت سمت تقاضا دارد. طبق تحقیق مرکز توزیع انرژی برق مستقر در بریتانیا، استفاده از روش‌های مدیریت شبکه‌های توزیع فعال در مقایسه با شبکه‌های بدون مدیریت، به پشتیبانی بیشتری برای بالا بردن سطح استفاده از DG می‌انجامد [۲].

منابع انرژی تجدید پذیر^۱ نقش مهمی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند. همان‌طور که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است، سه فن‌آوری مهم از این منابع برای تولید برق از انرژی خورشید، باد و امواج استفاده می‌کند [۴].



شکل (۲-۱): سه فن‌آوری مهم تجدید پذیر [۴]

با پیشرفت فن‌آوری در حوزه‌ی انرژی، انتظار می‌رود که مقدار زیادی از برق مورد نیاز توسط منابع انرژی‌های نو از جمله انرژی خورشیدی، تأمین شود. با توسعه فن‌آوری‌های منابع انرژی تجدیدپذیر،

¹ Renewable energy sources

استفاده از نیروگاه‌های تولید پراکنده برای مصرف‌کننده‌های کوچک دور از شبکه سراسری برق و همچنین ورود تولیدکنندگان برق در مقیاس کوچک به شبکه، مناسب گردیده است. امروزه، جامعه علمی مشغول بررسی‌هایی برای معرفی صفحات خورشیدی نسل سوم با ویژگی‌هایی همچون کاهش هزینه استفاده از برق این منابع شده است. هزینه آماده‌سازی نسل‌های جدید صفحات خورشیدی و اثرات زیست‌محیطی و همچنین وزن آن‌ها رو به کاهش و گستره دسترسی به آن برای مصرف‌کنندگان در سیستم توزیع افزایش یافته است [۵-۸].

۴-۱ ضرورت انجام تحقیق

محققان تاکنون مطالعاتی برای تجزیه و تحلیل پایداری ولتاژ در سیستم‌های الکتریکی با نفوذ^۱ بالای فوتوولتائیک (PV^۲) و اتصال آن به خطوط انتقال انجام داده‌اند [۹، ۱۰]. اما تعداد کمتری از آن‌ها بر روی شبکه‌های منطقه‌ای کوچک با ولتاژ پایین^۳ متمرکز شده‌اند. اثرات ادغام PV با توجه به ویژگی‌های سیستم‌های توزیع برق^۴ نظیر نسبت R/X بالای خط، تأخیر زیاد در کلید زنی و حضور واحدهای کوچک PV باید به‌طور کامل در سطح توزیع بررسی شود.

ورود منابع PV به سیستم توزیع انرژی برق مزایای بسیاری دارد. کاهش سطح استفاده از منابع آلاینده فسیلی، افزایش بهره‌وری از شبکه برق با توجه به آزاد شدن ظرفیت خطوط و کاهش تقاضای توان در زمان اوج مصرف شبکه، از مزایای ادغام PV به شبکه توزیع برق هستند. با توجه به نتایج مطالعات محققان در رابطه با ادغام PV به شبکه توزیع، مطالعه و تحلیل رابطه بین حضور گسترده این منابع و مسئله پایداری ولتاژ در سطح توزیع امری ضروری به نظر می‌رسد. مرجع [۹] یکی از اثرات سطوح بالای

¹ Penetration

² Photovoltaic

³ Low Voltage

⁴ Power Distribution Systems

نفوذ PV و از دست رفتن توان آن در موقع نیاز را به صورت فروپاشی ولتاژ^۱ نشان داده است. نتایج کار ما نیز نشان دادند که پایداری ولتاژ با ادغام PV، به عنوان یک مسئله مهم در شبکه‌های توزیع وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که گره‌هایی از شبکه‌های توزیع که به طور سنتی در سیستم توسعه یافته‌اند و بار زیادی دارند، موقعیت‌های منحصربه‌فردی برای حضور PV هستند. در سطوح پایین نفوذ PV، این نقاط از شبکه می‌توانند بدون مشکل پایداری ولتاژ ناشی از عواملی مانند عدم تولید توان به دلیل قطع PV یا به خاطر ابری شدن آسمان و کاهش مقدار تابش دریافتی PV و در نتیجه کاهش تولید توان، فعالیت کنند. در این پایان‌نامه به بررسی و تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات شبکه‌های توزیع با لحاظ ورود PV به آن، پرداخته می‌شود و پایداری ولتاژ و تلفات بدون در نظر گرفتن محدودیت در مقدار توان صفحات خورشیدی بررسی می‌شود. با انتخاب شاخص پایداری ولتاژ^۲ مورد نظر برای این پایان‌نامه، تأثیر حضور منابع خورشیدی بر پایداری ولتاژ سیستم توزیع مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۵ اهداف پژوهش

به طور کلی در این پایان‌نامه اهداف زیر حاصل می‌شوند:

۱. تحلیل شاخص‌های پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع با و بدون حضور منابع تولید توان

خورشیدی

۲. انتخاب یک شاخص برای تحلیل بر روی شبکه توزیع در حضور منابع تولید توان خورشیدی

۳. بررسی اثرات مختلف مانند پارامترهای شبکه و مقدار نفوذ واحدهای تولید توان خورشیدی

در این پایان‌نامه، از سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE برای مطالعه پایداری ولتاژ و تلفات شبکه

¹ Voltage collapse

² Voltage Stability Index

توزیع با وجود تولیدکننده‌های PV استفاده می‌شود. در بخش نخست فصل دوم این پایان‌نامه به مرور و بررسی پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت پرداخته می‌شود. سپس، به مرور و تحلیل شاخص‌های پایداری ولتاژ ویژه سیستم‌های توزیع که تاکنون توسط محققان مورد استفاده و بررسی قرار گرفته می‌پردازیم.

در فصل سوم، پس از مروری اجمالی بر صفحات خورشیدی و کاربردهای آن، به شبیه‌سازی چالش‌های پیش روی نصب PV و تأثیر آن بر یک سیستم توزیع دو گره نمونه پرداخته می‌شود و وضعیت پایداری ولتاژ شبکه نمونه با و بدون حضور PV با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ تجزیه و تحلیل می‌شود. در فصل چهارم پایان‌نامه، تأثیر نصب PV بر پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE مورد بررسی قرار می‌گیرد و در کنار آن از یک روش کلی بررسی پایداری ولتاژ نیز برای مقایسه و مطالعه بیشتر استفاده می‌شود. در فصل پنجم، نتایج کلی و پیشنهادهای ارائه شده است.

۲ فصل دوم

مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه پایداری و لتاژ

۲-۱ مقدمه

یکی از مباحث دستهبندی مسائل پایداری در سیستم‌های قدرت، شکل بروز ناپایداری است. بر این اساس، پایداری سیستم‌های قدرت به پایداری زاویه‌ای روتور^۱ (سنکرون)، پایداری فرکانس^۲ و پایداری ولتاژ^۳ تقسیم می‌گردد [۱۱، ۱۲]. بروز ناپایداری به صورت از دست رفتن کنترل ولتاژ منحصر به سیستم‌های قدرت تکامل یافته است. در این فصل، با مرور برخی از روش‌های بررسی پایداری ولتاژ، سعی می‌کنیم علاوه بر توضیح بیشتر مفاهیم کلیدی پایداری ولتاژ، روش‌های مهم تحلیل پایداری ولتاژ را که حاوی اطلاعات مفیدی برای پایداری ولتاژ میان مدت و کوتاه مدت هستند، بیان کنیم. بنابراین، هدف این فصل بررسی پایداری ولتاژ و روش‌های کلی تحلیل آن است. سپس مفاهیم مهمی به منظور تحلیل پایداری ولتاژ به دست می‌آیند. در این فصل، ابتدا مختصری به اهمیت پایداری سیستم قدرت پرداخته و انواع ناپایداری ولتاژ معرفی می‌شود و سپس به چند حادثه منجر به ناپایداری ولتاژ اشاره می‌کنیم. در انتها، اهمیت موضوع در سطح سیستم توزیع برق و در راستای هدف پایان نامه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲-۲ اهمیت پایداری سیستم قدرت

مسئله پایداری سیستم‌های قدرت به عنوان یکی از شاخص‌های بهره‌برداری امن از سیستم قدرت است. این پایداری به عملکرد سیستم قدرت در برابر اغتشاشاتی مانند اتصال کوتاه، تغییرات لحظه‌ای بار، قطع خطوط، تغییرات شدید تولید و... بستگی دارد. از این رو درک مشخصه‌ها و مدل‌سازی دقیق رفتار ژنراتورهای سنکرون در بخش تولید و انتقال، اهمیت قابل توجهی در مطالعه سیستم‌های قدرت دارد. تاکنون تعریف‌ها و تقسیم‌بندی‌های مختلفی از ناپایداری ولتاژ ارائه شده است. در تقسیم‌بندی اول، دقیقاً مثل ناپایداری زاویه بار، این ناپایداری به دو دسته اغتشاش کوچک و بزرگ تقسیم می‌شود. در تحلیل

¹ Rotor Angle Stability

² Frequency Stability

³ Voltage stability

اغتشاش کوچک از مدل خطی و در بزرگ از مدل غیرخطی سیستم استفاده می کنند [۱۱-۱۳].

۲-۳ انواع ناپایداری ولتاژ

۱. یک سیستم قدرت در یک نقطه کار مشخص، اگر پس از یک اغتشاش کوچک، ولتاژ به همان مقدار قبل از اغتشاش بازگردد و یا در همسایگی آن آرام بگیرد، پایداری ولتاژ اغتشاش کوچک نامیده می شود. با توجه به تئوری پایداری سیستم های خطی این در صورتی امکان پذیر است که مدل خطی شده سیستم، حول نقطه کار مورد نظر، مقادیر ویژه ای با قسمت حقیقی منفی داشته باشد.

۲. یک سیستم قدرت در یک نقطه کار مشخص، چنانچه ولتاژ سیستم پس از اغتشاش بزرگ، در نقطه تعادل بعد از خطا قرار بگیرد، پایدار اغتشاش بزرگ نامیده می شود. با توجه به تئوری پایداری سیستم های غیرخطی، این در صورتی امکان پذیر است که مقدار خطای ولتاژ در ناحیه همگرایی نقطه تعادل باقی بماند.

۳. یک سیستم قدرت در یک نقطه کار مشخص و تحت یک اغتشاش معین، چنانچه نقطه تعادل بعد از خطای آن به زیر حد قابل قبول (قابل تحمل) برسد، به فروپاشی ولتاژ می انجامد.

۲-۳-۱ ناپایداری کوتاه مدت

طبق تقسیم بندی دیگر ناپایداری ولتاژ، مثل ناپایداری زاویه، بر اساس محدوده زمانی به کوتاه مدت^۱، میان مدت^۲ و بلندمدت^۳ تقسیم می گردد. همانند ناپایداری زاویه بار، پایداری کوتاه مدت (پایداری گذرایی ولتاژ) نیز در محدوده زمانی صفر تا ده ثانیه تعریف می شود. عوامل اصلی ناپایداری ولتاژ،

¹ short-term

² mid-term

³ long-term

در ثانیه‌های اولیه، موتورهای القایی هستند. چنانچه در قسمتی از شبکه قدرت، مثل واحدهای بزرگ صنعتی، تعداد زیادی موتور القایی وجود داشته باشد، احتمال وقوع چنین پدیده‌ای بیشتر است. از این جهت ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت گاهی ناپایداری موتورهای القایی نامیده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی یک سیستم توزیع با موتور القایی که در آن از مدل دینامیکی موتور القایی استفاده شده است، نشان داده که پس از یک اغتشاش شدید، ولتاژ ممکن است به خارج از محدوده قابل قبول خود برسد [۹].

۲-۳-۲ ناپایداری میان‌مدت

ناپایداری ولتاژ میان‌مدت در عرض چند (دو الی سه) دقیقه بعد از خطا به وجود می‌آید. بعد از خارج شدن یک یا چند واحد تولیدی بزرگ از مدار در اثر یک اغتشاش شدید و یا خروج چند منبع تأمین‌کننده توان واکنشی از شبکه، ولتاژ افت می‌کند. ترانسفورماتورهای تغیر دهنده تپ، بعد از تشخیص افت ولتاژ و گذشت یک تأخیر زمانی تعریف شده برای آن‌ها، تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ ثانویه خود را بالا می‌برند تا ولتاژ ثانویه اصلاح شود و بارها در ولتاژ نامی خود توان لازم را جذب نمایند. عمل این تغیر دهنده‌ها جریان سیم‌پیچ اولیه آن‌ها را زیاد می‌کند. این اضافه جریان باعث افت ولتاژ بیشتر می‌شود و واحدهای تولیدی مجاور به حالت فوق تحریک می‌روند و ممکن است رله‌های جریان اضافه آن‌ها وارد عمل شوند. قطع این واحدها مجدداً باعث افت بیشتر ولتاژ می‌شود. تکرار این وقایع ولتاژ را به زیر حد نصاب قابل قبول می‌برد و پدیده ناپایداری ولتاژ در عرض چند دقیقه اتفاق می‌افتد.

۲-۳-۳ ناپایداری بلندمدت

ناپایداری ولتاژ بلندمدت در عرض بیش از چند دقیقه و به‌مرور زمان رخ می‌دهد. عامل اصلی آن عموماً اضافه شدن تدریجی بار (مثلاً در بعدازظهر یک روز گرم تابستانی) است که کم‌کم به افت ولتاژ و رسیدن آن به زیر حد قابل قبول منجر می‌شود. این نوع پدیده‌ها با زیادتر شدن مراکز بزرگ مسکونی و

تجاری و در نتیجه زیاده‌تر شدن تعداد هواسازها، که توان واکنشی قابل توجهی مصرف می‌کنند، بیشتر رخ می‌دهند.

۴-۲ مروری بر چند حادثه ناپایداری ولتاژ

در سال‌های اخیر حادثه‌های ناپایداری ولتاژ زیادی در سراسر جهان رخ داده است. بعضی از این حادثه‌ها به فروپاشی ولتاژ^۱ و در نهایت به خاموشی کامل^۲ سیستم منجر شده است. از جمله این حادثه‌ها، حادثه سال ۱۹۸۳ م سوئد، سال ۱۹۸۷ م فرانسه و خاموشی توکیو در سال ۱۹۸۷ م است. ریشه‌های ناپایداری و فروپاشی ولتاژ را می‌توان به چند دسته تقسیم نمود: اضافه شدن بیش از حد بار؛ به حد اشباع رسیدن منابع تأمین توان واکنشی؛ عملکرد نامناسب تغییردهنده تپ و قطع خط و خارج شدن واحدهای تولید در مقیاس بزرگ. بعضی از این وقایع منجر به بازیابی ولتاژ و بعضی منجر به فروپاشی ولتاژ شده‌اند [۱۱]. در ادامه به مرور برخی از این حادثه‌ها پرداخته می‌شود.

۱. حادثه ۱۹۸۲ فلوریدا، که خارج شدن یک واحد بزرگ تولید توان منجر به افت زیاد ولتاژ در شبکه گشت و با جزیره‌ای شدن شبکه و قطع کردن ۲۰۰۰ مگاوات بار و در مدار آوردن چند راکتور و خازن شنت در سطح ۲۳۰ کیلوولت ولتاژ بازیابی شد.

۲. حادثه ۱۹۸۲ بلژیک، که با قطع شدن یک واحد تولیدی ۷۰۰ مگاواتی و قطع زنجیره‌ای چند واحد دیگر به سبب Overload شدن و عملکرد رله‌ها و تریپ این واحدها در نهایت به فروپاشی ولتاژ انجامید.

۳. حادثه ۱۹۸۶ انگلستان، در اثر وضعیت نامساعد آب و هوایی تعدادی از خطوط ۴۰۰ کیلوولت قطع شدند و ولتاژ به ۳۵۲ کیلوولت رسید. با وارد شدن ۱۰۰۰ مگاوات تولید توسط واحدهای گازی

¹ Voltage collapse

² Blackout

در مدت ۵ دقیقه ولتاژ بازیابی شد.

۴. حادثه ۱۹۸۷ ژاپن (توکیو)، نتیجه بهره‌برداری حداکثری از شبکه به کاهش ظرفیت ذخیره چرخان انجامید و به دلیل گرمی بیش از حد هوا، اضافه باری در حد ۴۰۰ مگاوات بر دقیقه منجر به از مدار خارج شدن ۸۱۶۸ مگاوات شد تا ولتاژ به حالت عادی بازگردد.

۲-۵ هدف بررسی و تحلیل پایداری ولتاژ

در طراحی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، بررسی و تحلیل پایداری ولتاژ شامل بررسی دو مورد اساسی به صورت زیر است:

۱. چه اندازه سیستم به ناپایداری ولتاژ نزدیک است؟

۲. هنگامی که ناپایداری ولتاژ اتفاق می‌افتد، عوامل کلیدی مؤثر چه هستند؟ نقاط ضعیف به ناپایداری کدام‌اند؟ نحوه تعیین نقاط ضعیف به ناپایداری در سیستم به چه صورت امکان‌پذیر می‌شود؟

از بررسی مورد اول، اندازه حاشیه امنیت ولتاژ مشخص می‌شود. در حالی که بررسی مکانیسم ناپایداری (مورد دوم) اطلاعات مفیدی در جهت اصلاحات و استراتژی‌های کار و نحوه عملکردی سیستم در شرایط مختلف را به دست می‌دهد که می‌تواند برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ استفاده شود.

۲-۵-۱ روش‌های کلی تحلیل پایداری ولتاژ

به‌طور کلی، برای مطالعه پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت دو روش تحلیل به صورت دینامیکی و استاتیکی وجود دارد که در ادامه به آن‌ها می‌پردازیم.

۲-۵-۱-۱ روش‌های دینامیکی

ناپایداری ولتاژ یک پدیده دینامیکی است و می‌تواند با استفاده از شبیه‌سازی‌های توسعه‌یافته پایداری گذرا یا میان‌مدت، مطالعه شود. برای مطالعه پایداری ولتاژ سریع یا گذرا که دینامیک‌های بار و ژنراتور قابل مقایسه‌اند، استفاده از روش دینامیکی ضروری است. در این حالت، باید دینامیک کلیه ژنراتورها، بارها و وسایل کنترل در نظر گرفته شود. همچنین، برای بررسی هماهنگی بین کنترل‌ها و حفاظت، به استفاده از روش دینامیکی نیاز است. با این حال، این شبیه‌سازی‌ها، اطلاعات حساسیت یا درجه پایداری را فراهم نمی‌کنند. آن‌ها همچنین به زمان cpu^1 زیادی نیاز دارند و برای تجزیه و تحلیل آن‌ها دقت و وقت زیاد و دید مهندسی قوی نیاز است. در برخی مراجع، با استفاده از روش‌های دینامیکی، مطالعاتی روی پایداری ولتاژ سیستم‌های کوچک (شامل چند باس) صورت گرفته است.

۲-۵-۱-۲ روش‌های استاتیکی

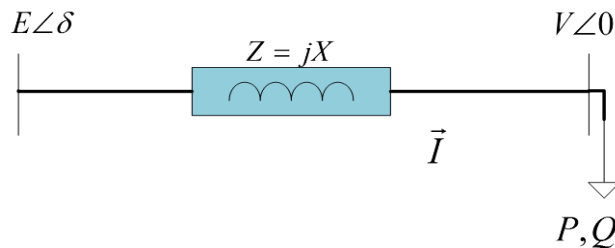
بررسی پایداری ولتاژ، اغلب به ملاحظه دامنه گسترده‌ای از شرایط سیستم و تعداد زیاد سناریوهای اختلال، نیاز دارد. برای این گونه کاربردها، تحلیل حالت دائم بیشتر مورد علاقه است. با استفاده از بررسی حالت دائم، می‌توان برای ناپایداری ولتاژ میان‌مدت و بلندمدت، اطلاعات نزدیکی به ناپایداری و اطلاعات حساسیت را به دست آورد.

۲-۶ بررسی پایداری ولتاژ با استفاده از منحنی V-P

پایداری ولتاژ طبق تعریف زیر کمیته جزئیات سیستم‌های دینامیکی IEEE به این صورت تعریف می‌گردد: "پایداری ولتاژ به توانایی یک سیستم برای حفظ سطوح ولتاژ در مقادیر قابل قبول است و هنگامی که افزایش ناگهانی تقاضای بار در شبکه داشته باشیم، قابلیت کنترل توأم بر روی توان به همراه ولتاژ وجود داشته باشد" [۱۴].

¹ Central Processing Unit

از مشخصه ولتاژ-توان حقیقی (V-P) و ولتاژ-توان موهومی (V-Q) برای مطالعه وضعیت پایداری می‌توان استفاده کرد. تاکنون در بعضی مطالعات با کمک گرفتن از منحنی‌های V-P به معرفی مرز پایداری سیستم پرداخته‌اند [۱۵]. در حالت دائم، نقطه کار هر نقطه از سیستم، از تقاطع مشخصه حالت دائمی بار و مشخصه V-P و V-Q مربوط به آن به دست می‌آید. در این بخش به بیان مفهوم ریاضی و رسم منحنی V-P برای شبکه ساده شعاعی شکل (۱-۲) پرداخته می‌شود.



شکل (۱-۲): شبکه دو گره نمونه

اگر در شکل (۱-۲) جریان طبق رابطه (۱-۲) حساب شود و در رابطه توان ظاهری (۲-۲) جایگذاری گردد، روابط توان حقیقی و موهومی طبق (۲-۲) و (۳-۲) به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$I = \frac{E\angle\delta - V}{jX} = \frac{E \cos \delta + jE \sin \delta - V}{jX} \quad (1-2)$$

$$S = P + jQ = V \cdot I^* = V \cdot \left(\frac{E \cos \delta + jE \sin \delta - V}{jX} \right)^* \quad (2-2)$$

$$S = \frac{EV \sin \delta}{X} + j \frac{EV \cos \delta - V^2}{X} \quad (3-2)$$

$$P = \frac{EV \sin \delta}{X} \quad (4-2)$$

$$Q = \frac{EV \cos \delta - V^2}{X} \quad (5-2)$$

که در روابط فوق P مقدار توان حقیقی بار، Q مقدار توان موهومی بار، E ولتاژ سمت فرستنده، V ولتاژ سمت دریافت کننده و X بیانگر امپدانس خط به صورت سلفی است. اکنون اگر متغیرهای نرمالیزه را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$p = \frac{P \cdot X}{E^2} \quad (6-2)$$

$$q = \frac{Q \cdot X}{E^2} \quad (7-2)$$

$$v = \frac{V}{E} \quad (8-2)$$

با توجه به تعریف مقادیر فوق روابط توان حقیقی و توان موهومی به صورت (2-9) و (2-10) حاصل می‌شوند:

$$p = v \cdot \sin \delta \quad (9-2)$$

$$q = v \cdot \cos \delta - v^2 \quad (10-2)$$

دو رابطه (2-9) و (2-10) اساس کار در رسم منحنی‌های v-p و q-v هستند. طبق شکل (2-1) اگر ولتاژ منبع ثابت باشد و در طرف مصرف کننده، یک بار بدون وجود ژنراتور یا بانک خازنی موجود باشد، با تغییر بار، ولتاژ طرف گیرنده تغییر می‌کند.

اساس استفاده از منحنی V-P برای داشتن تحلیلی از پایداری ولتاژ به این صورت است که به ازای چه مقدار افزایش یا کاهش در بارگذاری سمت گیرنده، ولتاژ در محدوده مجاز باقی خواهد ماند؟ برای

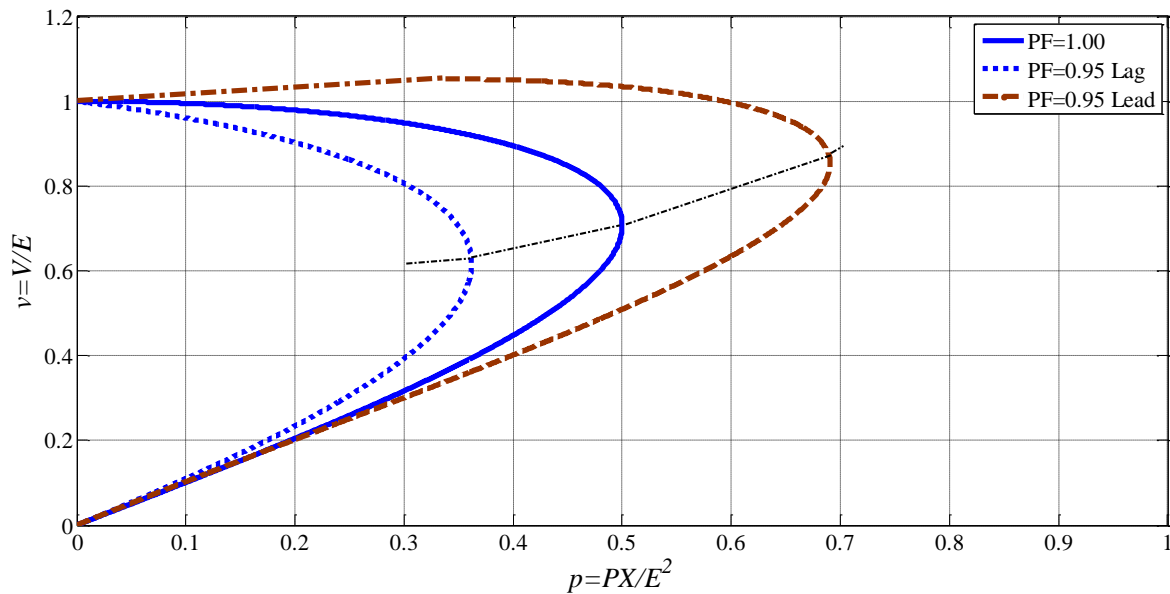
پاسخ به این سؤال با رجوع به منحنی V-P سیستم به ازای ضریب توان‌های مختلف بار، می‌توان نقطه بحرانی^۱ که در اثر بارگذاری تا آن سطح به ناپایداری ولتاژ می‌انجامد را تشخیص داد. مچوفسکی و همکارانش شکل دیگری از رابطه (۲-۹) و (۲-۱۰) را به صورت رابطه بین ولتاژ و توان و φ زاویه ضریب توان بار، طبق رابطه (۲-۱۱) این‌طور بیان کردند [۱۶]:

$$p = -v^2 \sin \varphi \cos \varphi + v \cos \varphi \sqrt{1 - v^2 \cos^2 \varphi} \quad (2-11)$$

شکل (۲-۲) با استفاده از رابطه (۲-۱۱) با در نظر گرفتن ضریب توان‌های متفاوتی برای بار، رسم شده است. از رسم شکل (۲-۲) به عنوان یک روش کلی برای تعیین مرز^۲ و حاشیه پایداری^۳ در نقاط مختلف شبکه قدرت می‌توان استفاده کرد. در رابطه (۲-۱۱) برای هر مقداری از ضریب توان^۴، می‌توان یک رابطه مشخص بین توان حقیقی p و ولتاژ v به دست آورد. به عبارت دیگر برای هر مقدار ضریب توانی یک منحنی v-p جداگانه به دست می‌آید. به عنوان مثال اگر ضریب توان برابر با یک باشد (بار صرفاً اهمی)، در این صورت مقدار ماکزیمم توان در $v=0.7pu$ اتفاق می‌افتد.

در شکل (۲-۲) در یک توان مشخص، دو نقطه تعادل برای ولتاژ در منحنی v-p بدست می‌آید. یک نقطه تعادل در قسمت بالای هر منحنی (پایدار^۵) و دیگری در قسمت پایین منحنی (ناپایدار^۶) قرار دارد. ولی فقط جواب‌های قسمت بالای منحنی منطقی است، چرا که در این ناحیه، هر چه تقاضای بار بیشتر شود ولتاژ پایین می‌آید. پس نقاط تعادلی که در قسمت بالایی هر نمودار قرار گرفته‌اند نقطه تعادل پایدار هستند.

¹ Critical Point
² Boundary
³ Stability Margin
⁴ Power Factor
⁵ Stable
⁶ Unstable



شکل (۲-۲): منحنی ولتاژ-توان به ازای ضریب توانهای مختلف

همان طور که شکل (۲-۲) نشان می‌دهد، قابلیت بارگذاری در مناطقی از شبکه که خاصیت خازنی دارند و یا خود بار ماهیت خازنی از خود نشان می‌دهد، بیشتر است و همچنین حاشیه بیشتری برای بارگذاری در وجود محدوده قابل قبول ولتاژ با این شرایط وجود دارد. طبق منحنی‌های شکل (۲-۲) اگر بار در شبکه دائماً افزایش یابد، بعد از یک نقطه بحرانی^۱ ولتاژ فرو می‌افتد و اصطلاحاً ناپایداری ولتاژ رخ می‌دهد. اگر این وضعیت منجر به از دست رفتن خط یا خطوطی از شبکه شود، بار بیشتری روی واحدهای تولیدی اعمال می‌شود و ممکن است این وضعیت برای سایر نقاط شبکه نیز روی دهد. به وضعیت گسترش ناپایداری ولتاژ در سیستم "فروپاشی ولتاژ" می‌گویند.

۷-۲ رسم منحنی V-P در یک گره مشخص

با استفاده از این روش منحنی V-P در یک گره مشخص از شبکه قدرت به دست می‌آید. همان گونه که قبلاً بیان شد، از این منحنی‌ها می‌توان برای بررسی پایداری ولتاژ، استفاده کرد. بدین

¹ Critical

منظور، گره آزمون باید به گونه‌ای انتخاب شود که P ، نشان‌دهنده بار کل در یک ناحیه یا توان انتقالی در یک خط مهم باشد. در ادامه، روند انجام الگوریتم اصلی رسم منحنی $V-P$ در یک گره آزمون، بیان خواهد شد [۱۷].

اگر توان موهومی تزریقی به گره آزمون n ، مشخص و برابر با $Q_n = Q^*$ باشد، منحنی $V-P$ طبق الگوریتم زیر قابل رسم است:

گام اول - ابتدا گره n را یک گره PQ در نظر گرفته و به ازای توان حقیقی فعلی و $Q_n = Q^*$ ، پخش بار را انجام داده و اندازه ولتاژ این گره (V_n)، به دست می‌آید.

گام دوم - حال، گره n را، یک گره PV ، فرض کرده و اندازه ولتاژ آن را برابر با V_n^{new} قرار می‌دهیم که در آن:

$$V_n^{new} = V_n^{old} - \Delta V \quad (\Delta V > 0) \quad (18-2)$$

و به ازای P_n قبلی پخش بار را انجام می‌دهیم. در این صورت، مقدار توان موهومی تزریقی به گره n به دست می‌آید که آن را با Q_n نشان می‌دهیم. حال واضح است که:

$$\Delta Q_n = Q_n - Q^* < 0 \quad (19-2)$$

زیرا بدون تغییر در P_n ، برای اینکه $V_n^{new} < V_n^{old}$ باشد، توان موهومی تزریقی به گره n ، یعنی Q_n ، باید کوچکتر از Q^* باشد.

گام سوم - چون هدف این است که در V_n جدید و بدون تغییر در توان موهومی تزریقی به گره n ، P_n جدید را مشخص کنیم و از طرفی می‌دانیم که حساسیت اندازه ولتاژ، به تغییرات توان حقیقی، کمتر از حساسیت آن، به تغییرات توان موهومی است، پس اگر بخواهیم V_n جدید را بدون تغییر در توان

موهومی تزریقی به گره n به دست آوریم، باید قرار دهیم:

$$P_n^{new} = P_n^{old} + \Delta P_n \quad (20-2)$$

که $\Delta P_n < \Delta Q_n$ است. چون در این مرحله ΔP_n مشخص نیست، بنابراین قرار می‌دهیم:

$$P_n^{new} = P_n^{old} + \Delta Q_n \quad (21-2)$$

حال، دوباره پخش توان را، با فرض اندازه ولتاژ V_n^{new} و توان P_n^{new} در گره n انجام می‌دهیم و Q_n جدید را به دست می‌آوریم. با قرار دادن $P_n^{old} = P_n^{new}$ ، اگر رابطه $|Q_n - Q^*| \leq \varepsilon$ برقرار باشد (که ε یک مقدار مثبت کوچک و مشخص است)، به گام دوم می‌رویم. در غیر این صورت از رابطه $\Delta Q_n = Q_n - Q^* < 0$ ، ΔQ_n و از رابطه $P_n^{new} = P_n^{old} + \Delta Q_n$ ، P_n^{new} محاسبه شده، پخش بار تکرار، و Q_n جدید محاسبه می‌گردد. این روند تا برقراری رابطه $|Q_n - Q^*| \leq \varepsilon$ تکرار می‌شود.

گام چهارم - مراحل فوق تا تعیین منحنی V-P تکرار می‌شوند.

۸-۲ مروری بر شاخص‌های پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع برق

با توجه به سطح ولتاژ، سیستم قدرت به سه بخش تولید^۱، انتقال^۲ و سیستم توزیع تقسیم می‌شود. به‌طور مشخص، سیستم انتقال کاملاً متفاوت از سیستم توزیع در عملکرد و ویژگی است. گرچه سیستم انتقال بزرگ‌ترین قسمت سیستم قدرت است ولی تنها دسته بزرگ این سیستم نیست. سیستم توزیع، توان را از خطوط انتقال دریافت نموده و به بار تحویل می‌دهد. تفاوت اصلی بین سیستم انتقال و سیستم توزیع در ساختار شبکه و سطح ولتاژ است. به‌طور کلی، سیستم انتقال عموماً یک ساختار حلقوی و سیستم توزیع ساختار شعاعی^۳ دارد. یک شبکه توزیع قدرت مدرن به‌طور مداوم با رشد تقاضای

¹ Generation

² Transmission

³ Radial

بار مواجهه است. به طور واضح، هر روزه شبکه‌های توزیع، تغییر بار از سطح کم به بالا را با توجه میزان تقاضا دارند. با توجه به این نکات، مطالعه و تجزیه و تحلیل پایداری ولتاژ سیستم قدرت در شبکه‌های توزیع شعاعی، متفاوت از سایر نقاط سیستم با سطوح بالای ولتاژ است. تاکنون، محققان برای مطالعه و بررسی پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع شعاعی شاخص‌هایی معرفی کرده‌اند که در این فصل به مرور و تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.

در سال ۱۹۹۱ میلادی، Jasmon و همکارانش یک روش برای بررسی پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع شعاعی معرفی کردند [۱۸]. آن‌ها دیاگرامی تک‌خطی از شبکه توزیع در نظر گرفتند و برای مطالعه پایداری یک شاخص ارائه کردند. روش مورد استفاده آن‌ها فقط برای بررسی سیستم در عملکرد مناسب کارایی داشت چراکه ولتاژ تمام نقاط سیستم را برابر با ۱ pu در نظر گرفته بودند. Chakravorty در سال ۲۰۰۱، یک شاخص پایداری ولتاژ^۱ برای تشخیص گره‌هایی از سیستم توزیع که بیشترین حساسیت به فروپاشی دارند معرفی نمود [۱۹]. آن‌ها نشان دادند که گرهی که در آن ارزش شاخص پایداری ولتاژ حداقل است، حساسیت بیشتری نسبت به فروپاشی ولتاژ دارد و مدل‌سازی مرکبی از انواع بار برای تجزیه و تحلیل پایداری ولتاژ در روش آن‌ها در نظر گرفته شده است. یک شاخص جدید پایداری ولتاژ نیز با لحاظ شبکه‌های توزیع توسط Guiping در سال ۲۰۰۹ معرفی شده است [۲۰]. آن‌ها با استفاده از سیستم معادل با توجه به شبکه توزیع ولتاژ بالا و متوسط، روش ردیابی بر خط^۲ حاشیه پایداری ولتاژ^۳ در سیستم معادل را پیشنهاد کردند.

یک شاخص جدید برای بررسی پایداری ولتاژ که از تحلیل دیاگرام فازوری کمک می‌گیرد، توسط Aman در سال ۲۰۱۲ معرفی شد [۲۱]. آن‌ها از این شاخص برای جابجایی بهینه DG استفاده کردند. یک

¹ Voltage Stability Index

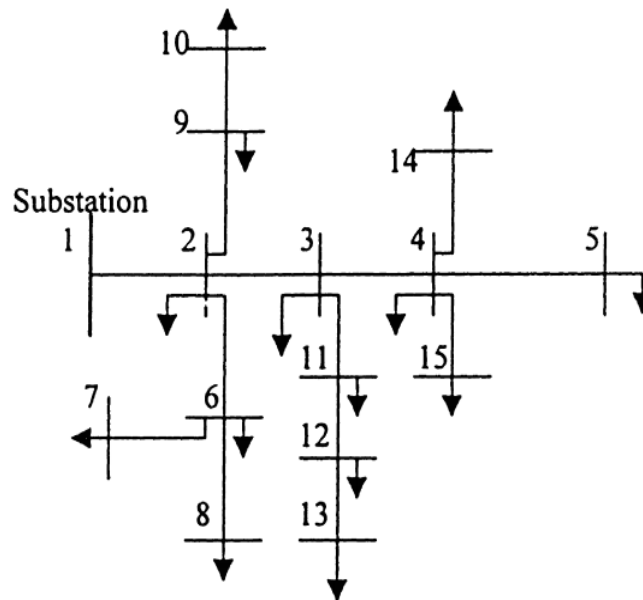
² on-Line

³ Voltage Stability Margin

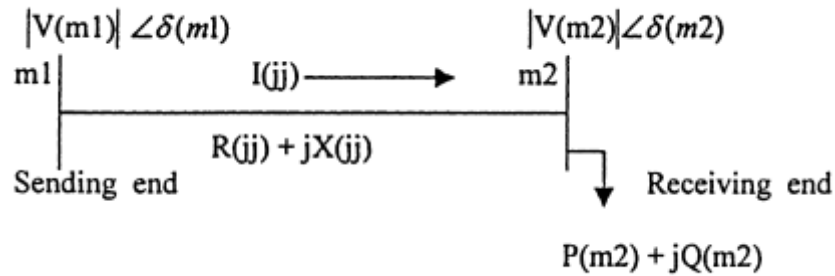
جایابی بهینه DG بر اساس یک شاخص جدید پایداری ولتاژ نیز توسط Murty در سال ۲۰۱۵ انجام شد. شاخص معرفی شده آن‌ها اختلاف زاویه ولتاژ بین گره فرستنده و گیرنده توان را صفر در نظر می‌گیرد و از این رو، این شاخص تقریبی از وضعیت پایداری ولتاژ را بیان می‌کند [۲۲]. در ادامه به معرفی رابطه ریاضی برخی از این شاخص‌ها می‌پردازیم.

۲-۸-۱ شاخص پایداری ولتاژ Chakravorty

Chakravorty و همکارانش برای مطالعه شبکه‌های توزیع شعاعی، شاخصی برای بررسی پایداری ولتاژ معرفی کردند [۱۹]. آن‌ها با در نظر گرفتن یک شبکه نمونه مطابق با شکل (۲-۳) اقدام به بررسی وضعیت ولتاژ در سمت گره دریافت‌کننده کردند.



شکل (۲-۳): مدل تک‌خطی شبکه توزیع شعاعی مورد مطالعه در [۱۹]



شکل (۴-۲): یک شاخه نمونه از شبکه توزیع شعاعی [۱۹]

شکل (۴-۲) یک شاخه نمونه از شبکه شکل (۳-۲) در نظر می‌گیرد. می‌توان جریان را به صورت رابطه (۲-۲) (۱۲) به دست آورد:

$$I(jj) = \frac{V(m1) - V(m2)}{r(jj) + jx(jj)} \quad (12-2)$$

$$P(m2) - jQ(m2) = V^*(m2)I(jj) \quad (13-2)$$

در روابط فوق، jj شماره شاخه، $m1$ گره سمت فرستنده و $m2$ گره سمت دریافت کننده توان در هر شاخه است. با جایگذاری رابطه (۱۲-۲) در (۱۳-۲) می‌توان نشان داد:

$$|V(m2)|^4 - \left\{ |V(m1)|^2 - 2P(m2)r(jj) - 2Q(m2)x(jj) \right\} |V(m2)|^2 + \left\{ P^2(m2) + Q^2(m2) \right\} \left\{ r^2(jj) + x^2(jj) \right\} = 0 \quad (14-2)$$

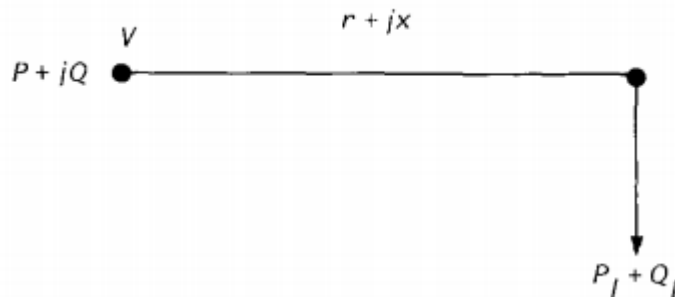
از حل رابطه (۱۴-۲) برای ولتاژ سمت دریافت کننده، برای داشتن پاسخ قابل قبول باید رابطه (۱۵-۲) برقرار باشد:

$$SI(m2) = \left\{ |V(m1)|^2 - 2P(m2)r(jj) - 2Q(m2)x(jj) \right\}^2 - 4.0 \left\{ P^2(m2) + Q^2(m2) \right\} \left\{ r^2(jj) + x^2(jj) \right\} \geq 0 \quad (15-2)$$

Chakravorty مقدار SI را در هر گره به عنوان شاخص پایداری ولتاژ مناسب سیستم‌های توزیع معرفی کرد. برای داشتن عملکرد پایدار در شبکه توزیع این مقدار همواره باید بزرگ‌تر مساوی صفر باشد. هرچه مقدار این شاخص به صفر نزدیک‌تر شود، شبکه به سمت ناپایداری می‌رود. در یک شبکه توزیع، گرهی که کوچک‌ترین مقدار شاخص را به خود اختصاص دهد، ضعیف‌ترین گره به فروپاشی ولتاژ است.

۲-۸-۲ شاخص پایداری ولتاژ Jasmon

Jasmon با در نظر گرفتن یک مدل تک‌خطی از سیستم توزیع مطابق با شکل (۲-۵) و با استفاده از رابطه توان حقیقی و موهومی در گره فرستنده و گیرنده و تلفات خط طبق (۲-۱۶) و (۲-۱۷) نشان داد که سیستم زمانی از نظر ولتاژ پایدار است که رابطه (۲-۱۸) در شبکه برقرار باشد [۱۸].



شکل (۲-۵): مدل تک‌خطی سیستم توزیع در [۱۸]

$$P = \frac{r(P^2 + Q^2)}{V^2} + P_l \quad (۲-۱۶)$$

$$Q = \frac{x(P^2 + Q^2)}{V^2} + Q_l \quad (۲-۱۷)$$

$$L = 4((xP_l - rQ_l)^2 + xQ_l + rP_l) < 1 \quad (۲-۱۸)$$

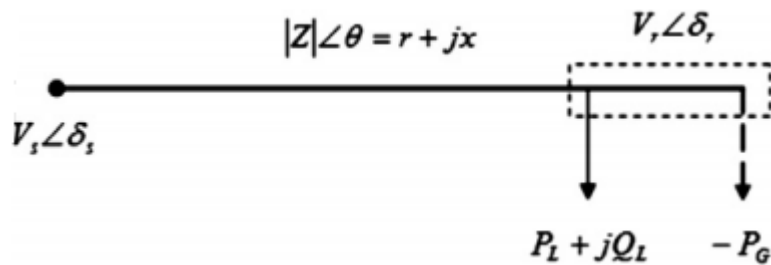
Jasmon نشان داد که برای یک شبکه توزیع با مقاومت معادل r_{eq} و اندوکتانس معادل x_{eq} رابطه فوق طبق (۱۹-۲) قابل توسعه است:

$$L = 4((x_{eq}P_l - r_{eq}Q_l)^2 + x_{eq}Q_l + r_{eq}P_l) < 1 \quad (19-2)$$

هرچه مقدار این شاخص به یک نزدیک شود، سیستم به سمت ناپایداری می‌رود. در روابط فوق Q_l و P_l مجموع بار شبکه توزیع شعاعی است. تغییری که ممکن است بر ولتاژ گره مورد نظر مثلاً بر اثر بارگذاری به وجود آید در این شاخص در نظر گرفته نشده است، چراکه Jasmon ولتاژ تمام نقاط سیستم را با فرض اولیه برابر با ۱ pu در نظر گرفته بود و پایداری ولتاژ سیستم را فقط به مقدار بار شبکه و ساختار خطوط شبکه مرتبط می‌داند.

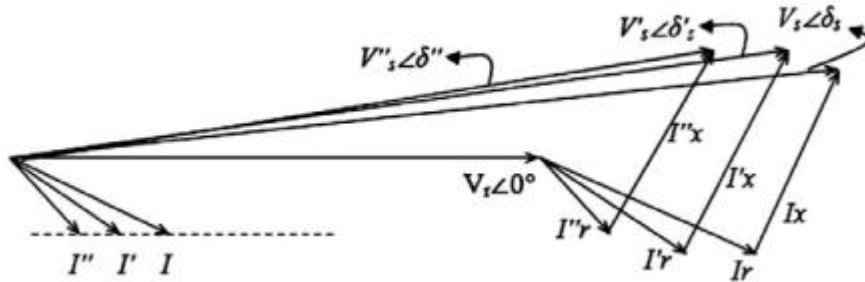
۲-۸-۳ شاخص PSI

Aman موضوع استفاده از DG برای تولید توان حقیقی در سمت مصرف‌کننده‌های شبکه توزیع و تأثیر آن بر پایداری ولتاژ را با معرفی شاخص PSI^۱ برای شبکه دو گره شکل (۶-۲) مطرح کرد [۲۱]. او با استفاده از دیاگرام فازوری شکل (۷-۲) و توجه به بهره‌برداری از DG فقط به صورت تولید توان حقیقی، شاخص PSI را طبق رابطه (۲۰-۲) معرفی نمود.



شکل (۶-۲): شبکه دو گره نمونه، استفاده از DG برای تولید توان حقیقی در سمت بار [۲۱]

¹ Power Stability Index



شکل (۷-۲): دیاگرام فازوری بهره‌برداری از DG به صورت تولید توان حقیقی در [۲۱]

$$PSI = \frac{4r_{ij}(P_L - P_G)}{[|V_i| \cos(\theta - \delta)]^2} \leq 1 \quad (۲۰-۲)$$

طبق رابطه (۲۰-۲) اگر با وجود ادغام توان DG به شبکه توزیع، شاخص PSI به یک نزدیک شود، در آن گره ولتاژ ناپایدار خواهد شد. از نقطه نظر پایداری ولتاژ، Aman ظرفیت بهینه DG در شبکه توزیع برق را با استفاده از حداقل کردن شاخص PSI پیشنهاد کرده است.

۴-۸-۲ شاخص پایداری ولتاژ Guiping برای بارهای امپدانس ثابت

مرجع [۲۰] یک شاخص برای محاسبه حاشیه پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع طبق رابطه (۲۱-۲) به صورت زیر معرفی می‌کند:

$$VSM_Z = \frac{Z_L - Z_0}{Z_0} \quad (۲۱-۲)$$

Guiping برای امپدانس بار داده شده (Z_L)، و امپدانس خط (Z_0) از تفاوت Z_L و Z_0 به صورت یک حاشیه ایمنی از وضعیت پایداری ولتاژ شبکه در نظر گرفته است.

۹-۲ وابستگی بار به ولتاژ در سیستم توزیع

در این بخش، ابتدا وابستگی بار به ولتاژ مطرح می‌شود و به تعریف مدل‌های مختلف بار می‌پردازیم. سپس، برخی مدل‌های کلی که برای تحلیل بارهای مجتمع پیشنهاد می‌شوند را مورد بحث

قرار می‌دهیم. مدل‌سازی بار، کار مشکلی است چراکه بارهای سیستم قدرت، به شکل اجتماعی از تجهیزات بسیار متفاوت در شبکه هستند. بخش اصلی در این مورد، تشخیص ترکیب بار در یک زمان مشخص و مدل کردن اجتماع مؤلفه‌های بار به صورت مناسب است.

مشخصه بار^۱، عبارتی است که توان حقیقی یا موهومی مصرف شده به وسیله بار را به عنوان تابعی از ولتاژ و متغیر مستقلی که تقاضای بار^۲ نامیده می‌شود، بیان می‌کند. برای سادگی در روابط، تقاضای بار را با z نشان می‌دهیم. شکل کلی مشخصه بار چنین است:

$$P = P(z, V) \quad (22-2)$$

$$Q = Q(z, V) \quad (23-2)$$

توان باری که به صورت واقعی مصرف می‌شود، یعنی (P, Q) و تقاضای بار z دو مفهوم کاملاً جدا هستند. توجه به این نکته، برای درک مفهوم ناپایداری که در آن افزایش تقاضا باعث کاهش توان مصرفی می‌شود، مهم است. در اینجا، وابستگی بارها به فرکانس را در نظر نمی‌گیریم، زیرا در پدیده‌های پایداری ولتاژ، تغییرات فرکانس دارای اهمیت اساسی نیستند [۱۲].

۲-۹-۱ مدل بار به صورت نمایی

یکی از مشخصه‌های بار که به‌طور گسترده استفاده می‌شود، مشخصه بار به صورت نمایی^۳ هست که دارای رابطه کلی زیر است:

$$P = z P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (24-2)$$

¹ Load Characteristic

² Demand

³ Exponential Load

$$Q = zQ_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (25-2)$$

در روابط فوق z متغیر تقاضای بار (بدون بعد) و V_0 ولتاژ مرجع است. نماهای α و β به نوع بار (موتوری، گرمایشی، روشنایی و ...) بستگی دارند. zQ_0 و zP_0 توان‌های حقیقی و موهومی مصرف شده در شرایط ولتاژ $V = V_0$ هستند و به مقدار تجهیزات نصب شده بستگی دارند. آن‌ها به عبارتی، توان‌های اسمی بار هستند که با توان‌های مصرفی^۱ P و Q متفاوت هستند. به‌طور کلی، سه حالت خاص از نماهای مختلف بار مورد توجه ویژه هستند:

۱. بار امپدانس ثابت که با Z مشخص می‌شود ($\alpha = \beta = 2$).

۲. بار جریان ثابت که با I مشخص می‌شود ($\alpha = \beta = 1$).

۳. بار توان ثابت که با P مشخص می‌شود ($\alpha = \beta = 0$).

مقادیر α و β برای بارهای کاملاً امپدانس، جریانی و توان ثابت به صورت عددی صحیح در بالا مشخص گردید. در جدول (۲-۱)، برخی از نماهای کسری α و β مربوط به بارهای بخصوص در شبکه برق، ارائه شده است [۱۲]. نماهای α و β در مدل بار نمایی، حساسیت توان بار به ولتاژ را تعیین می‌کنند. با فرض اینکه ولتاژ مرجع V_0 و توان حقیقی متناظر آن P_0 باشد، حساسیت توان حقیقی نسبت به ولتاژ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dP}{dV} = \alpha P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha-1} \frac{1}{V_0} \quad (26-2)$$

¹ Consumed

جدول (۱-۲): نماهای کسری α و β برای برخی از بارها

نوع بار	مقدار α	مقدار β
لامپ‌های التهابی	۱/۵۴	توان موهومی صفر است
هواساز اتاق	۰/۵	۲/۵
فن کوره	۰/۰۸	۱/۶
شارژ کننده باتری	۲/۵۹	۴/۰۶
فلورسنت فشرده	۰/۹۵-۱/۰۳	۰/۳۱-۰/۴۶
فلورسنت معمولی	۲/۰۷	۳/۲۱

یک رابطه مشابه رابطه (۲-۲۶)، برای توان موهومی نیز وجود دارد. با مرتب کردن رابطه بالا و ارزیابی حساسیت در $V = V_0$ ، مشخصه و نوع هر باری در سیستم توزیع برق مشخص می‌شود. با ارزیابی حساسیت در $V = V_0$ ضرایب α و β طبق (۲-۲۷) و (۲-۲۸) به دست می‌آید:

$$\frac{dP/P_0}{dV/V_0} = \alpha \quad (۲۷-۲)$$

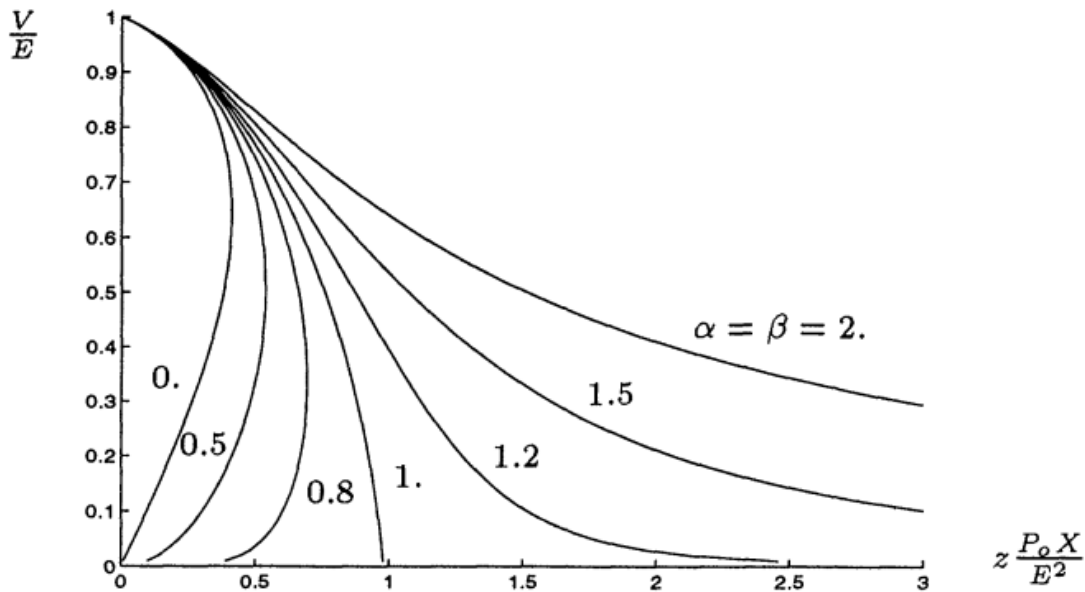
$$\frac{dQ/Q_0}{dV/V_0} = \beta \quad (۲۸-۲)$$

نقطه کار سیستم برای درخواست‌های مختلف بار، به وسیله تقاطع دو مشخصه بار و شبکه تعیین می‌شود. با وارد کردن مشخصه بار نمایی در معادلات شبکه، روابط توان به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$-\frac{EV}{X} \sin \theta = zP_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (۲۹-۲)$$

$$-\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta = zQ_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (۳۰-۲)$$

با استفاده از روش حل عددی برای روابط (۲-۲۹) و (۲-۳۰)، منحنی تقاضای بار را می‌توان برای مدل‌های مختلف بار رسم نمود. آنچه در این بخش حائز اهمیت است، اثر در نظر گرفتن مدل بار بر نحوه مطالعه پایداری ولتاژ شبکه توزیع است. یک نمودار V به صورت تابعی از z که به روش عددی محاسبه شده است، در شکل (۲-۸) نشان داده شده است.



شکل (۲-۸): ولتاژ بر حسب تقاضای بار (z) برای مدل‌های مختلف بار نمایی [۱۲]

در شکل (۲-۸) برای سادگی، فرض می‌کنیم $\alpha = \beta$ و ضریب توان بار ثابت و متناظر با

$$\frac{Q_0}{P_0} = 0.2 \text{ باشد. دو رفتار متفاوت در منحنی‌های حل مشاهده می‌شود:}$$

۱. برای $\alpha = \beta \geq 1$ فقط یک حل V برای هر مقدار تقاضای z وجود دارد.
۲. برای $\alpha = \beta < 1$ یک مقدار آستانه z^{\max} وجود دارد، به طوری که برای $z < z^{\max}$ دو حل و برای $z = z^{\max}$ فقط یک حل وجود دارد و برای $z > z^{\max}$ هیچ‌گونه حلی وجود ندارد. چنان‌که دیده

می‌شود، z^{\max} با کم شدن $\alpha (= \beta)$ کاهش می‌یابد. $z = z^{\max}$ ، حد توانایی تحویل بار در سیستم نامیده می‌شود. این شرایط کار با بزرگ‌ترین تقاضای بار که برای آن یک حل وجود دارد، متناظر است. توجه کنید که در حالت اول ($\alpha = \beta \geq 1$) هیچ‌گونه حدی برای توانایی تحویل توان به بار وجود ندارد.

می‌توان نشان داد که نتایج بالا برای همه شبکه‌های توزیع پسیو که دارای بارهایی با $P_0 > 0$ هستند، معتبر است. در حالت کلی‌تر که $\alpha \neq \beta$ است، نتایج زیر به دست می‌آید:

۱. به ازای $\alpha > 1$ یک مقدار β^* وجود دارد، به طوری که برای $\beta > \beta^*$ ، برای هر z یک حل وجود دارد. هر چه α بزرگ‌تر باشد، β^* کوچک‌تر است.

۲. برای $\alpha < 1$ ، بدون توجه به مقدار β ، یک آستانه z^{\max} وجود دارد به طوری که برای $z > z^{\max}$ سیستم دارای هیچ‌گونه جوابی نیست.

۲-۱۰ جمع‌بندی

در این فصل پس از بیان تئوری پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت، با مرور برخی از حوادث در این زمینه، اهمیت بررسی و مطالعه موضوع مورد بررسی قرار گرفت. سپس تعدادی از مهم‌ترین شاخص‌های پایداری ولتاژ مختص شبکه‌های توزیع شعاعی که تاکنون توسط محققان مورد استفاده و بررسی قرار گرفته‌اند، مرور شد. در این بین، شاخص‌هایی مدل بار را نیز به‌عنوان یک عامل کلیدی تأثیرگذار بر پایداری ولتاژ را در سطح توزیع معرفی کردند. شاخص پایداری ولتاژ Chakravorty با در نظر گرفتن مدل چندجمله‌ای بار این وضعیت را در نظر می‌گیرد. شاخص پایداری ولتاژ Guiping نیز نوع بار را در نظر گرفت و برای بارهای امپدانس ثابت یک شاخص پایداری ولتاژ جدید معرفی کرد. با توجه به تغییرات زیاد در مقدار بار مصرفی خانگی، مطالعه موضوع پایداری ولتاژ با استفاده از رسم منحنی V-P در سیستم

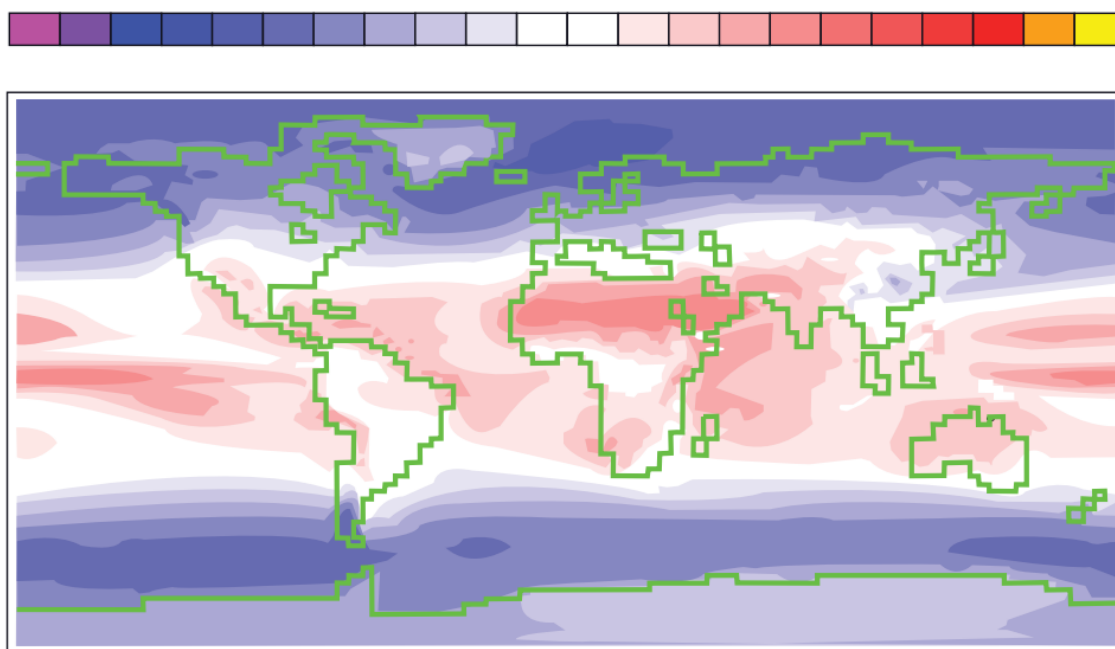
توزیع و الگوریتم‌های پیچیده ارائه شده جهت رسم آن‌ها، امری مشکل و زمان‌بر به نظر می‌رسد. حال آنکه بحث حضور گسترده PV در سیستم‌های توزیع آینده و تأثیری که بر سطح پایداری شبکه دارند نیز مطرح است. یکی از کاربردهای شاخص‌های پایداری ولتاژ در شبکه‌های توزیع می‌تواند مطالعه و بررسی سریع شبکه در حضور گسترده PV و مطالعه تأثیر مقدار نفوذ بر پایداری ولتاژ سیستم باشد. به‌عنوان کاربرد دیگری از شاخص پایداری ولتاژ، می‌توان برای رسیدن به حداکثر بهره‌برداری از شبکه توزیع با ادغام مقدار مناسب PV به شبکه، از آن استفاده کرد.

۳ فصل سوم

تحلیل پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع با حضور منابع خورشیدی

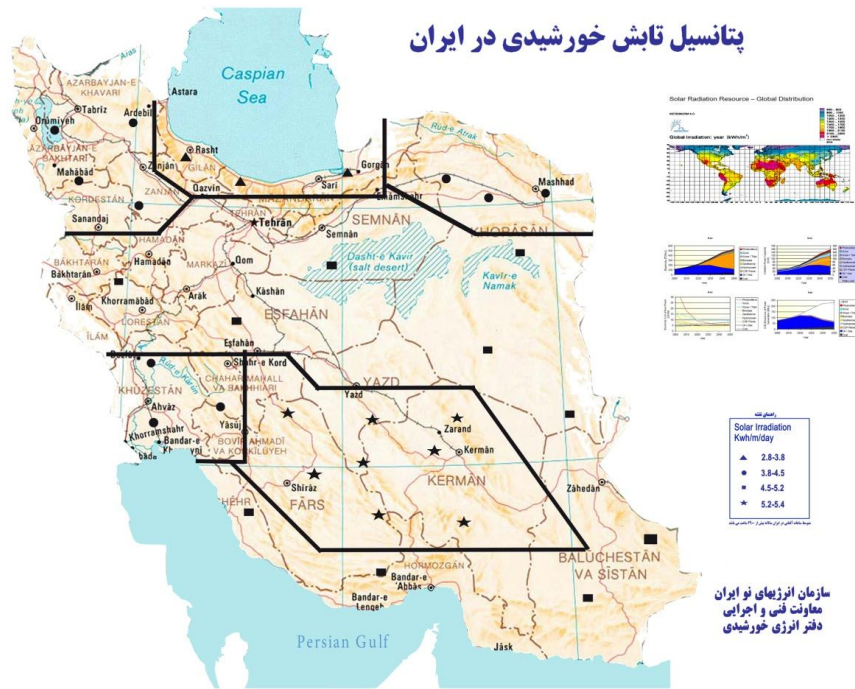
۱-۳ مقدمه

همان‌طور که در فصل نخست اشاره شد، یکی از سه فن‌آوری مهم منابع تجدید پذیر انرژی، صفحات خورشیدی هستند. یکی از عوامل کلیدی در تعیین مقدار سطح دسترسی به این منابع شرایط و موقعیت جغرافیایی محیط است. همان‌طور که شکل (۱-۳) نشان می‌دهد، در نقشه میزان تابش دریافتی کره زمین از خورشید، ناحیه نزدیک به خط استوا در کره زمین (نواحی قرمز رنگ) مقدار بیشتری نسبت به سایر نقاط از تابش خورشید بهره‌مند هستند.



شکل (۱-۳): بهره‌مندی نواحی مختلف کره زمین از تابش خورشید [۴]

در شکل (۱-۳)، فلات ایران منطقه‌ای با میزان دریافت بالای تابش خورشید است. طبق مطالعات سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا)، مقدار پتانسیل تابش خورشیدی در مناطقی که در شکل (۲-۳) با ستاره و مربع علامت‌گذاری شده‌اند، دارای شرایطی ویژه برای نصب صفحات خورشیدی در مقیاس وسیع است.

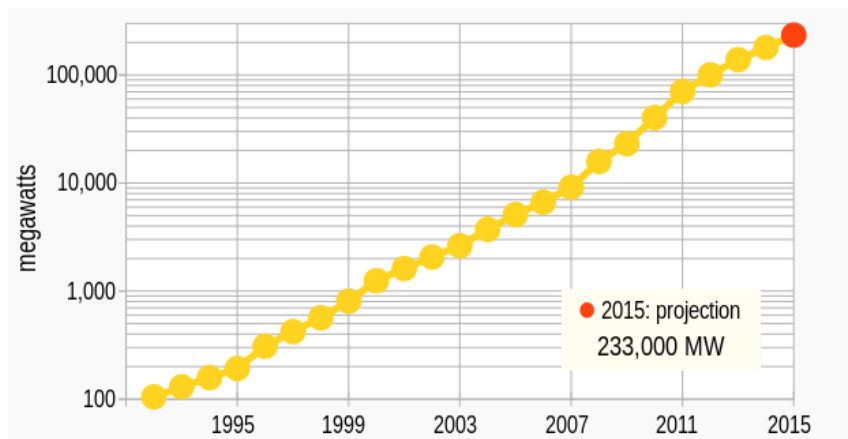


شکل (۳-۲): اطلس تابش خورشیدی ایران [۲۳]

طبق داده‌های آماری و اطلاعات منتشرشده در رابطه با صفحات خورشیدی، همان‌طور که شکل

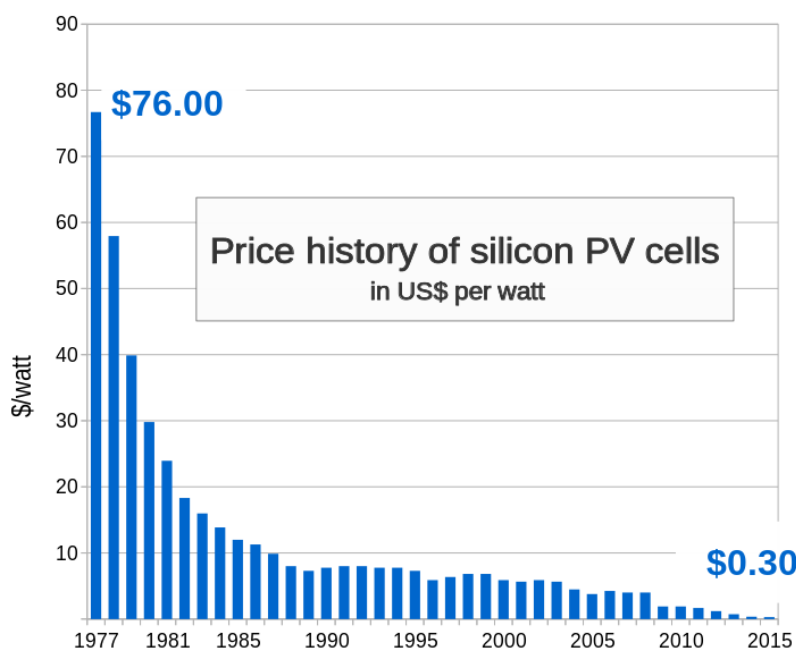
(۳-۳) نشان می‌دهد، مقدار ظرفیت نصب‌شده صفحات خورشیدی در سال ۲۰۱۵ میلادی به ۲۳۳

گیگاوات افزایش یافته است [۲۴].



شکل (۳-۳): ظرفیت نصب‌شده صفحات خورشیدی از سال ۱۹۹۲ میلادی تاکنون [۲۴]

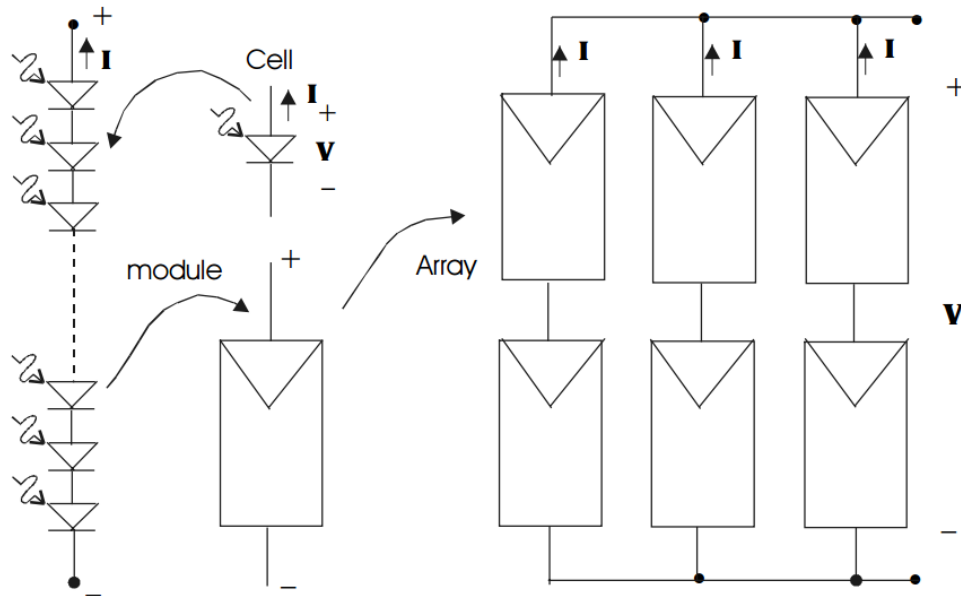
به‌طور کلی، استفاده از منابع خورشیدی روشی گران‌قیمت برای تولید برق محسوب می‌شود، ولی با بررسی چشم‌انداز آینده به قیمت حامل‌های انرژی و همچنین رو به کاهش بودن سوخت‌های فسیلی در آینده، گرایش به بسترسازی مناسب برای ورود این منابع از هم‌اکنون می‌تواند توجیه شود. با توسعه فن‌آوری در ساخت و بهره‌برداری از این منابع قیمت آن‌ها روندی نزولی قابل توجهی را طی کرده است. در سال ۲۰۱۵ همان‌طور که شکل (۳-۴) نشان می‌دهد، قیمت تمام‌شده صفحات خورشیدی برای تولید هر یک وات توان الکتریکی به ۰.۳ دلار کاهش یافته است [۲۴].



شکل (۳-۴): قیمت صفحات خورشیدی سیلیکونی به ازای هر وات تاکنون [۲۴]

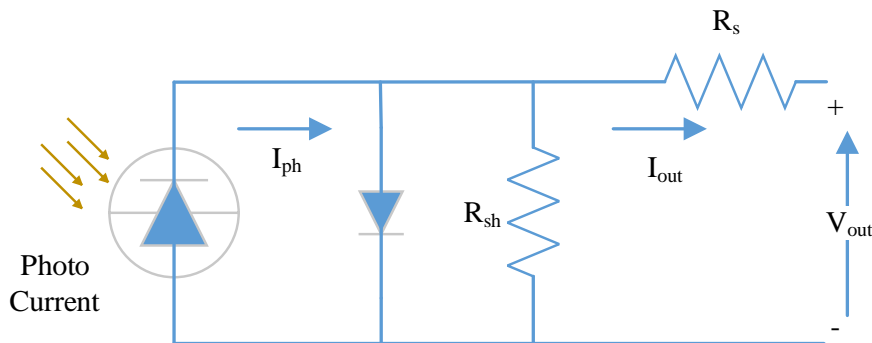
۲-۳ مدار معادل صفحات خورشیدی

مرجع [۲۵] طبق شکل (۳-۵)، مجموعه‌ای از گروه‌های سری و موازی شده از سلول‌های خورشیدی را یک آرایه خورشیدی معرفی می‌کند.



شکل (۳-۵): اجزای تشکیل‌دهنده یک آرایه خورشیدی [۲۵]

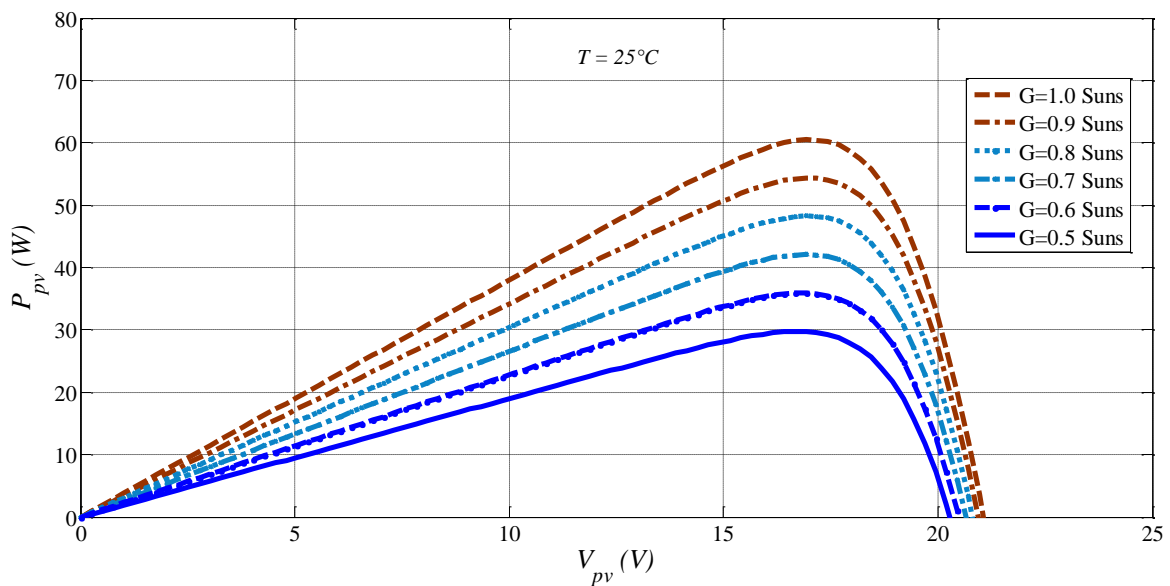
طبق این شکل یک آرایه خورشیدی مجموعه‌ای از فوتو دیودها است. محققان، مدار معادل یک صفحه خورشیدی را به صورت شکل (۳-۶) از یک منبع جریان و یک دیود و مقاومت‌های سری و موازی در نظر می‌گیرند. با توجه به مدار معادل، یک صفحه خورشیدی به عنوان یک منبع تولید توان غیرخطی است.



شکل (۳-۶): مدار معادل PV

۳-۳ تأثیر تغییرات تابش بر منحنی مشخصه PV

دمای محیط و تابش دریافتی دو عامل تأثیرگذار بر مقدار توان تولیدشده PV هستند [۲۶]. در شرایط بهره‌برداری از PV در شبکه، تأثیر تغییرات عامل تابش بیشتر مورد توجه محققان است [۹، ۲۷]، چراکه دمای محیط عاملی لخت است. این در صورتی است که عامل تابش به راحتی تحت شرایطی نظیر ابری شدن آسمان می‌تواند تغییر کند و در نتیجه توانی که PV به شبکه تحویل می‌داد از دست برود. اطلاعات کامل از یک مدل صفحه خورشیدی (MSX-60) در [۲۶] آمده است. با شبیه‌سازی این مدل در نرم‌افزار متلب^۱، منحنی مشخصه توان برحسب ولتاژ در دمای ثابت و تابش متغیر، مطابق با شکل (۳-۷) به دست می‌آید.

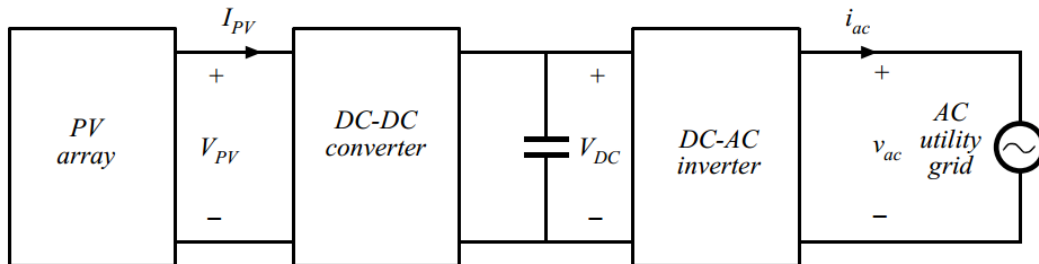


شکل (۳-۷): اثر تغییر تابش بر مشخصه توان-ولتاژ صفحه خورشیدی MSX-60

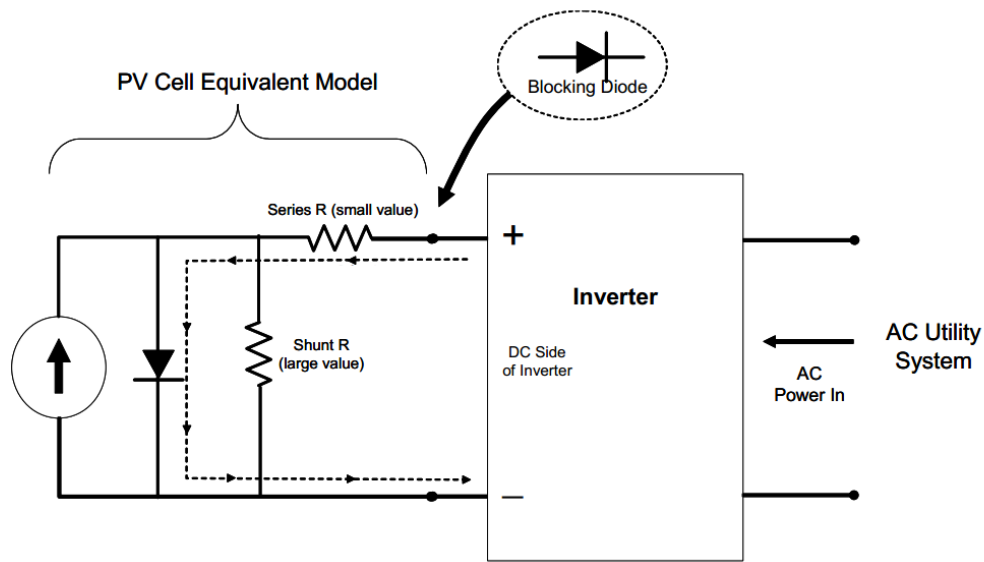
با توجه به مشخصه غیرخطی PV در شکل (۳-۷)، جهت به دست آوردن حداکثر توان و همچنین تبدیل ولتاژ این منابع به صورت قابل استفاده در شبکه متناوب (AC)، از دو سیستم مختلف شکل‌های (۳-۸) و (۳-۹) جهت بهره‌برداری از PV استفاده می‌شود. وظیفه ردیابی حداکثر توان از

¹ Matlab

صفحات خورشیدی بر عهده مبدل جریان مستقیم و وظیفه کنترل ولتاژ بر عهده واپایشگر^۱ اینورتر بر روی سطح ولتاژ خازن است.



شکل (۸-۳): ادغام توان PV به شبکه از طریق ردیابی حداکثر توان (مبدل جریان مستقیم) و اینورتر [۲۸]



شکل (۹-۳): ادغام توان PV به شبکه فقط از طریق اینورتر [۲۹]

مزیت استفاده از سیستم شکل (۸-۳) نسبت به (۹-۳) در استفاده از دو سیستم کنترلی مجزا است. در سیستم شکل (۸-۳) وظیفه ردیابی حداکثر توان (MPPT)^۲ به عهده مبدل DC/DC و وظیفه کنترل ولتاژ خازن در لینک DC بر عهده اینورتر است. با وجود راندمان پایین و قیمت نسبتاً بالای PV،

^۱ Controller

^۲ Maximum Power Point Tracking

باید استفاده بهینه از هر سلول خورشیدی مورد توجه قرار گیرد. از این رو باید دستگاهی برای کنترل توان سلول‌های خورشیدی در نظر گرفته که با قرار دادن سلول خورشیدی در بهترین نقطه کار بیشترین توان دریافتی را داشته باشد و در صورت تغییر این نقطه به واسطه شرایط مختلف، بتواند نقطه کار بهینه را به سرعت ردیابی کند.

۳-۴ روش‌های به‌کارگیری از صفحات خورشیدی

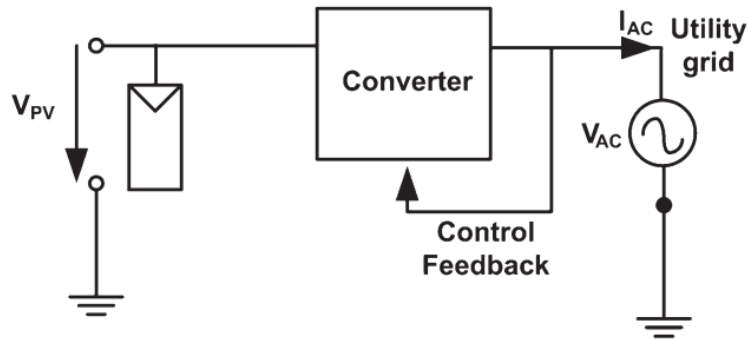
از صفحات خورشیدی به دو صورت بهره‌برداری می‌شود. روش نخست اتصال به شبکه برق است و روش دوم در صورتی که به دلایلی دسترسی به شبکه امکان‌پذیر نباشد، PV به بار متصل می‌شود.

۳-۴-۱ متصل به شبکه سراسری برق

در روش متصل به شبکه^۱، انرژی الکتریکی حاصل از PV (با مبدل جریان مستقیم به جریان متناوب، همچون اینورترهای متصل به شبکه و ...) ضمن تغییر شکل و تطبیق سطح ولتاژ و فرکانس، با مشخصات سطح ولتاژ، اختلاف‌فاز و فرکانس شبکه سراسری به شبکه برق ادغام می‌گردد. با استفاده از نیروگاه‌های PV متصل به شبکه سراسری به صورت متمرکز و یا غیرمتمرکز (ضمن تقویت وضع فعلی در شبکه توزیع)، مانع از افت ولتاژ شبکه توزیع گردیده و در نتیجه از فشار بر روی نیروگاه‌های بخار در طی روز جلوگیری می‌شود. حتی فناوری‌های جدیدی در این رابطه بر روی هوشمند سازی اینورتر PV به کار گرفته شده است [۳۰]. این امر مشابه آن است که هر مشترک شبکه سراسری برق، با نصب سیستم متصل به شبکه، خود به‌عنوان DG، به صورت نیروگاهی کوچک عمل نماید. در این روش علاوه بر تأمین بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کننده، انرژی الکتریکی (مازاد بر مصرف) به شبکه سراسری برق تزریق می‌شود [۲۳]. در حالت اتصال PV به شبکه، برای داشتن کیفیت مناسب جریان ادغام‌شده به

¹ Grid Connected

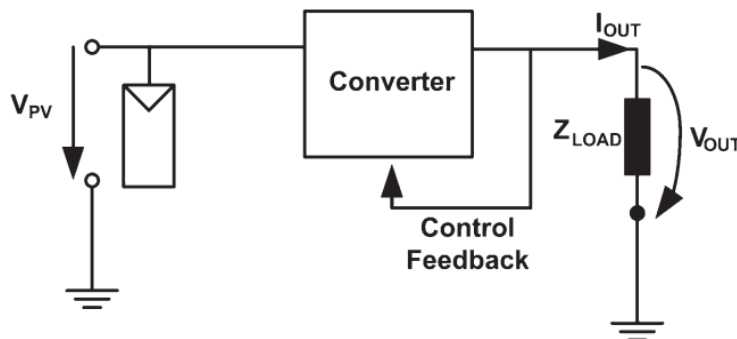
شبکه، سیستم کنترلی بر روی مقایسه جریان اینورتر با شبکه طبق شکل (۳-۱۰) عمل می‌کند.



شکل (۳-۱۰): سیستم PV متصل به شبکه سراسری برق [۳۱]

۳-۴-۲ مستقل از شبکه سراسری برق

طبق شکل (۳-۱۱) در حالت مستقل از شبکه^۱ با اتصال به بار، برای تأمین انرژی الکتریکی ایستگاه‌های مخابراتی و تلویزیونی، خانه‌های مسکونی، چادرهای عشایری، کلبه‌های روستایی و به صورت کلی رفع نیاز انرژی الکتریکی مناطقی است که دور از شبکه سراسری برق می‌باشند.



شکل (۳-۱۱): سیستم PV متصل به بار [۳۱]

این بخش سهم بالایی از دستگاه‌های مستقل از شبکه را در جهان به خود اختصاص داده است. در بسیاری از کشورهای جهان (به‌ویژه در حال توسعه جهت تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز روستاهای فاقد

¹ Stand Alone

برق از این سیستم استفاده می‌گردد) به‌طور مثال، در سال ۲۰۰۷ کشور اندونزی برق‌رسانی به ۱۵۰۰۰ خانوار روستایی را از این طریق آغاز نموده است [۲۳]. عدم نیاز به سوخت و مشکلات سوخت‌رسانی به‌ویژه در مناطق صعب‌العبور و عدم نیاز به تعمیر و نگهداری مداوم و طول عمر مناسب، ازجمله عمده مزایایی است که در رشد و توسعه این دستگاه‌ها به‌ویژه در نقاط محروم کشور نقش عمده و بسزایی دارد.

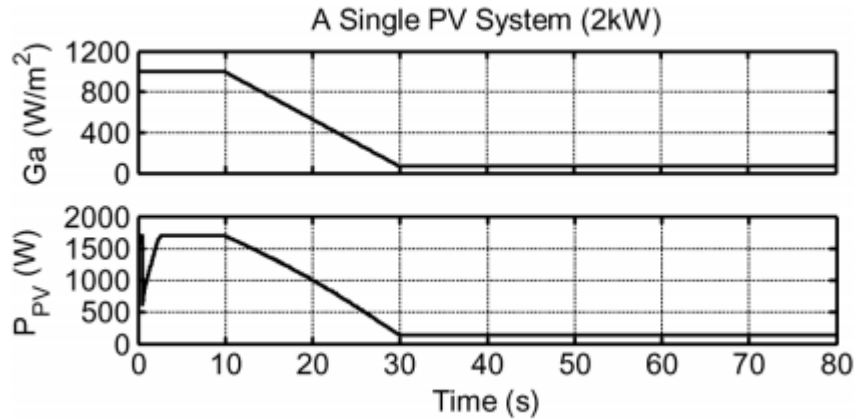
۳-۵ اثر افت توان PV بر شبکه توزیع

در مرجع [۳۲] خلاصه‌ای از پژوهش‌های Whitaker و همکارانش در سال ۱۹۸۵ راجع به ادغام PV به شبکه آمده است. گزارش ارائه‌شده به آزمایشگاه انرژی‌های تجدید پذیر ایالات متحده (NREL)^۱ اثر شناخته‌شده ادغام PV به شبکه را افزایش ولتاژ معرفی می‌کند. در این گزارش چندین روش تجزیه و تحلیل استاتیک کنترل ولتاژ، مانند پشتیبانی توان موهومی توسط اینورتر روی تنظیم تغییر بار (OLTC)^۲، و کلید زنی خازن انجام شده است [۳۳]. در یکی دیگر از این گزارش‌ها که در سال ۲۰۰۸ به NREL ارائه شد، تجزیه و تحلیل دینامیکی در مقیاس بزرگ استفاده از PV در سیستم انتقال، به‌طور عمده در پاسخ به خروج واحد، خروج بار و خطا روی شبکه قدرت متمرکز شده است [۳۴]. تاکنون، موضوع افت توان PV به خاطر اثرات گذرای ناشی از ابری شدن آسمان و تأثیری که این موضوع بر شبکه دارد مورد توجه محققان قرار گرفته است. آن‌ها یک نمونه افت توان PV به خاطر کاهش تابش بر اثر ابری شدن آسمان را طبق شکل (۳-۱۲) در نظر گرفته و به مطالعه تأثیری که بر شبکه توزیع می‌گذارد پرداختند [۹، ۲۷].

در شرح گزارش آزمایشگاه Sandia، افت گذرای ولتاژ ناشی از ابری شدن آسمان به‌صورت نرم و آرام در نظر گرفته شده است. در این گزارش اظهار شده که با نفوذ PV تا میزان بیشتر از ۲۰٪ ممکن است مشکل به وجود آید [۲۹]. اگرچه، هیچ تجزیه و تحلیل دقیقی ارائه نشده است.

¹ National Renewable Energy Laboratory

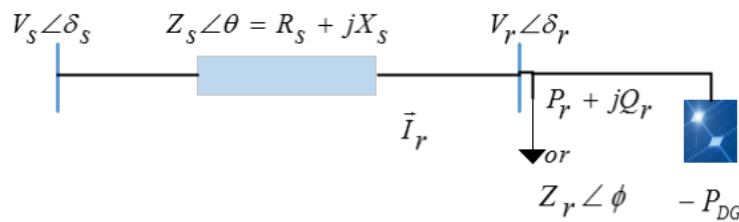
² On-Load Tap Changer



شکل (۳-۱۲): تغییر توان PV بر اثر افت تابش در مرجع [۹]

۳-۶ شبیه‌سازی دو نمونه افت توان PV و اثر آن بر ولتاژ شبکه توزیع

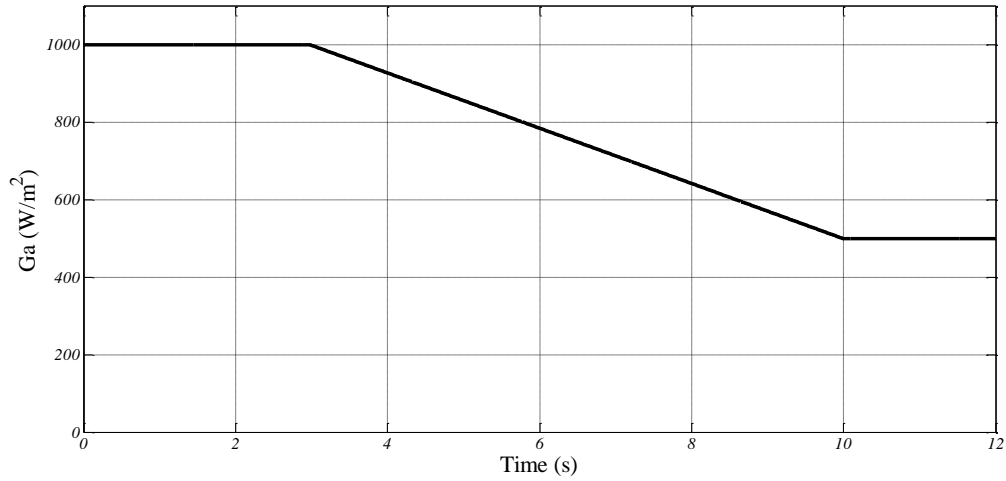
برای بررسی موضوع، از سیستم دو گره دلخواه شکل (۳-۱۳) با مدل خط شماره ۳۰۰ طبق سیستم توزیع نمونه ۳۴ گره IEEE که در محیط سیمولینک شبیه‌سازی شده، استفاده می‌شود. همچنین از مدل PV موجود در کتابخانه سایت نرم‌افزار متلب استفاده شده است، اطلاعات کامل مدل PV در مرجع [۳۵] موجود است. PV با توان ۱۷ کیلووات (نفوذ تقریباً ۴۰٪) در محل بار با اندازه ۴۵ کیلووات و ۲۰ کیلووات نصب شده است.



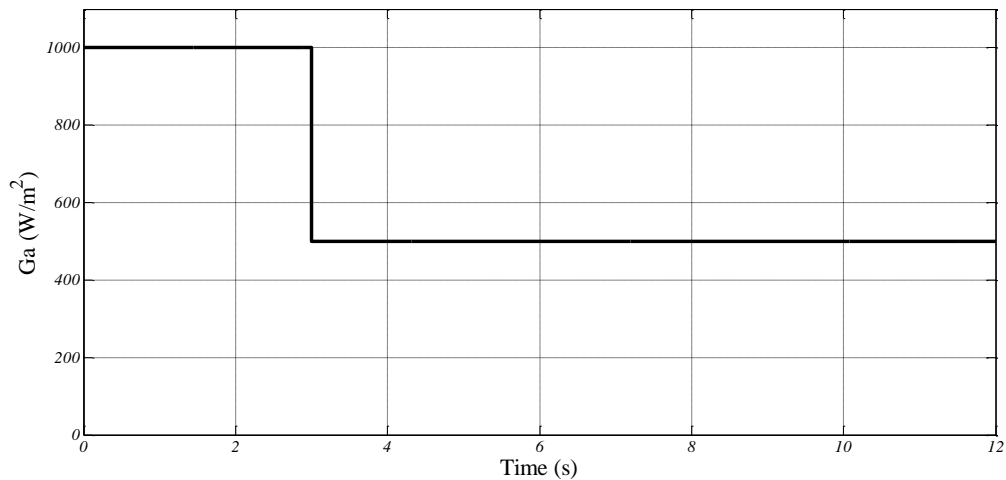
شکل (۳-۱۳): شبکه دو گره نمونه با ادغام PV

شکل‌های (۳-۱۴) و (۳-۱۵) دو مدل تابش در برابر گذر ابر را نشان می‌دهند. PV طبق سیستم

شکل (۳-۸) با مبدل بوست و اینورتر به شبکه متصل شده است.



شکل (۳-۱۴): تغییر نرم تابش بر اثر ابری شدن آسمان

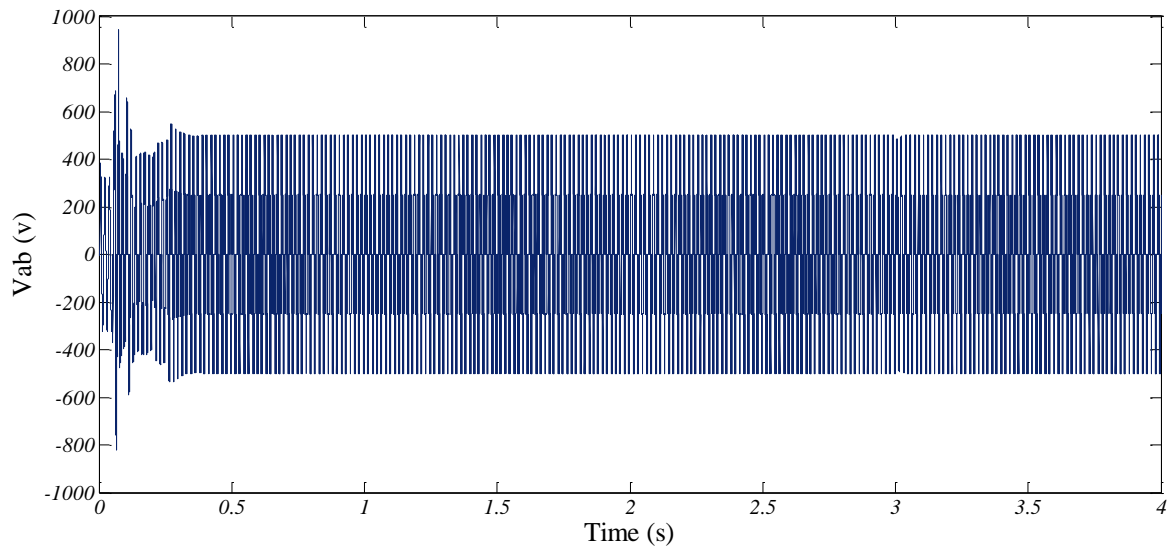


شکل (۳-۱۵): تغییر سریع تابش بر اثر ابری شدن آسمان

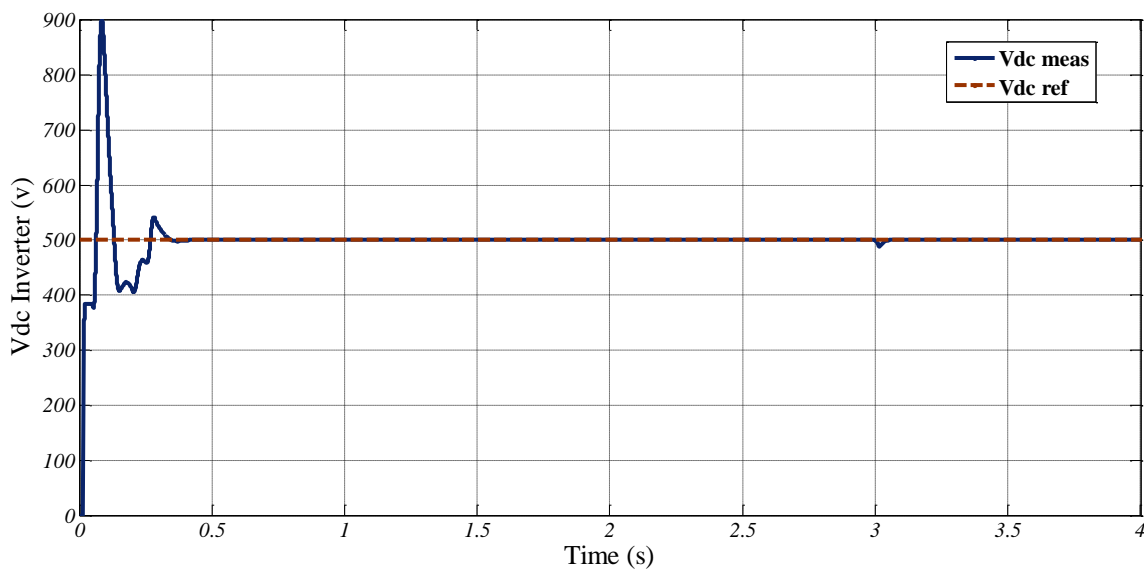
شکل (۳-۱۶) ولتاژ خط به خط پایانه خروجی اینورتر PV را نشان می‌دهد. واپایشگر اینورتر سه

سطحی طبق شکل (۳-۱۷)، ولتاژ خازن در ترمینال ورودی اینورتر را به ۵۰۰ ولت تنظیم و ثابت نگه

می‌دارد؛ همچنین با استفاده از ترانسفورماتور سطح ولتاژ به پیک ولتاژ شبکه می‌رسد.



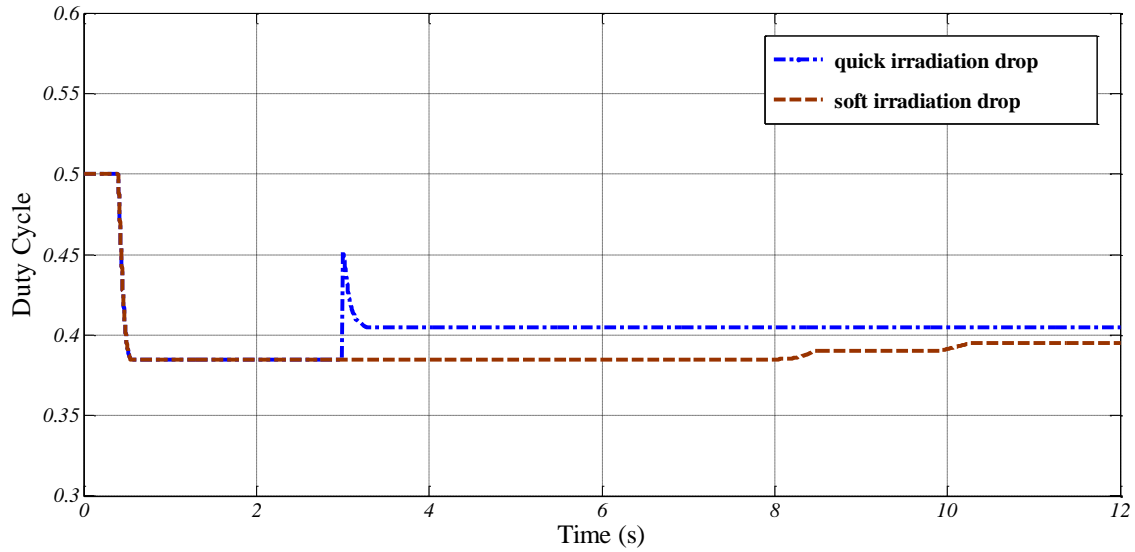
شکل (۳-۱۶): ولتاژ خط به خط اینورتر سه سطحی متصل به PV



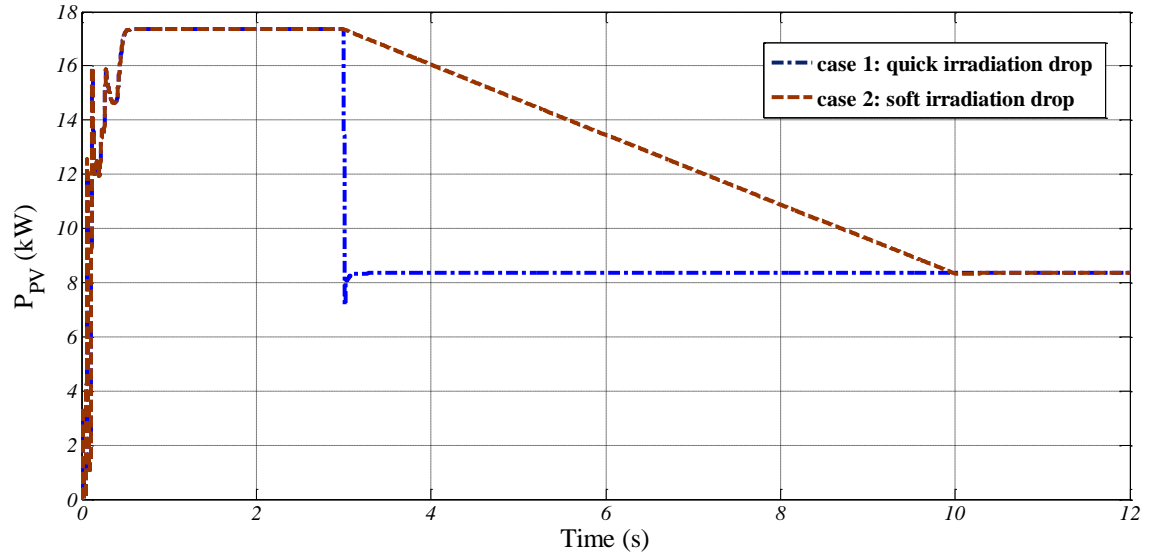
شکل (۳-۱۷): عملکرد واپایشگر تثبیت ولتاژ در ورودی اینورتر PV

شکل (۳-۱۴) برای بررسی اثر افت نرم تابش خورشید بر ولتاژ شبکه در نظر گرفته شده و در این مورد از [۹، ۲۷، ۳۶] بهره گرفته‌ایم. شکل (۳-۱۵) نیز افت ناگهانی تابش خورشید را به‌عنوان بدترین حالت ممکن از دست رفتن توان PV نشان می‌دهد. شکل (۳-۱۸) عملکرد مبدل جریان مستقیم برای

ردیابی حداکثر توان را طبق شکل (۳-۱۹) برای هر دو مدل افت تابش PV نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۸): نسبت زمان وظیفه به زمان دوره برای ردیابی حداکثر توان در مبدل جریان مستقیم

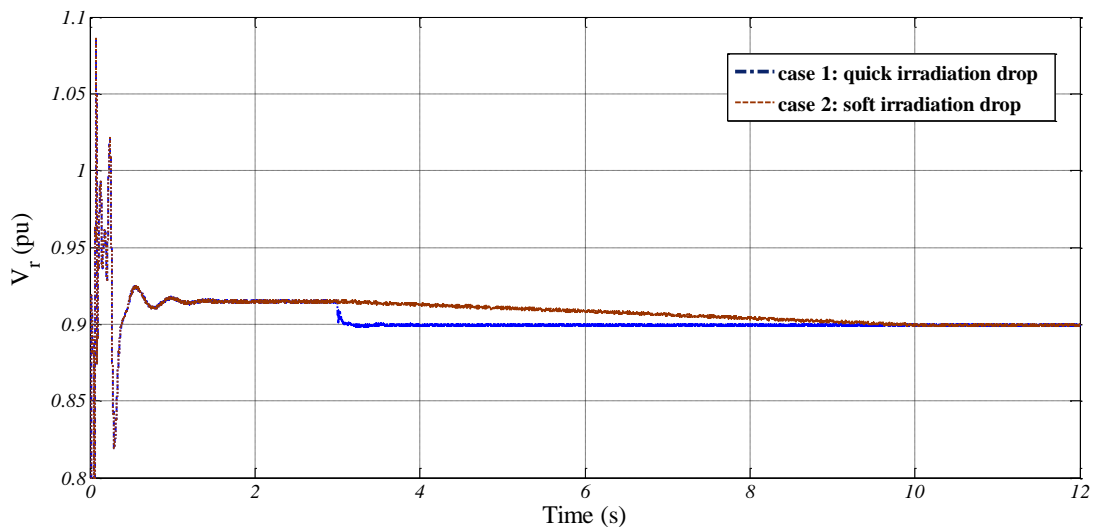


شکل (۳-۱۹): افت توان ردیابی از PV بر اثر افت تابش

همان‌طور که شکل (۳-۱۹) نشان می‌دهد، بر اثر افت تابش در ثانیه سوم شیب‌سازی، توان

تولیدی PV نیز کاهش می‌یابد. کاهش توان بسته به نوع افت تابش می‌تواند نرم یا سریع باشد که این

موضوع دینامیک سریع PV نسبت به تابش را نشان می‌دهد. وضعیت و لتاژ در گره سمت دریافت‌کننده (مکانی که PV در آنجا نصب شده است)، با افت توان PV، مطابق با شکل (۳-۲۰) است. همان‌طور که شکل (۳-۲۰) نشان می‌دهد، و لتاژ شبکه در محل نصب PV با افت سریع تابش سریعاً کاهش می‌یابد که بسته به سطح پایداری در گره دریافت‌کننده، مقدار و لتاژ در نقطه تعادل جدید قرار می‌گیرد.



شکل (۳-۲۰): و لتاژ گره سمت بار (V_r) با افت توان PV در نفوذ ۴۰٪

اغتشاشی که در شروع نمودارهای مربوط به توان و و لتاژ دیده می‌شود به ردیابی حداکثر توان از صفحات خورشیدی و واپایشگر مبدل مربوط می‌گردد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، افت ناگهانی و همچنین افت نرم توان PV در صورتی که مقدار توان نصب‌شده PV کسری از مقدار بار باشد، ضربه شدیدی به و لتاژ وارد نمی‌کند. طبق شبیه‌سازی انجام شده، می‌توان چند نتیجه اساسی گرفت و سؤالات مهمی را مطرح کرد:

۱. نصب PV در شبکه به بهبود وضعیت و لتاژ کمک می‌کند؛ حال آنکه با افت توان PV (مثلاً به خاطر افت تابش دریافتی)، و لتاژ در حالت دائم به مقدار قبل از نصب PV می‌رسد.

۲. طبق نتیجه قبل و شکل (۲-۲) (منحنی‌های ولتاژ-توان) اگر در نقاطی از شبکه با نصب PV حاشیه مناسب امنیت پایداری ولتاژ در زمان پیک بار ایجاد گردد، در صورت از دست رفتن توان PV، سیستم دچار ناپایداری ولتاژ می‌گردد. بنابراین یک حد مجاز برای نصب توان PV در سطح توزیع باید در نظر گرفته شود.

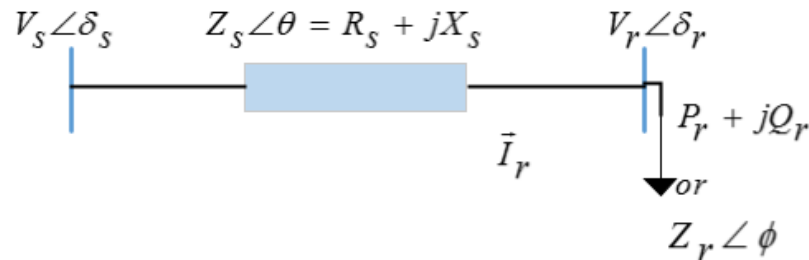
۳. اثر PV بر سطح پایداری ولتاژ و قابلیت بارگذاری شبکه چقدر است؟ آیا نصب PV به وضعیت پایداری ولتاژ شبکه کمک می‌کند یا لطمه می‌زند؟

با پاسخ به دو سؤال فوق، بخشی از چالش‌ها و موانع اساسی پیش روی ورود PV به شبکه‌های توزیع مشخص می‌شوند. برای جواب دادن به سؤالات فوق، در دو بخش به بررسی اثر PV بر مقدار قابلیت بارگذاری یک شبکه نمونه و همچنین تأثیر آن بر پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع برق می‌پردازیم. برای بررسی تأثیر PV در سطح توزیع از یک شاخص پایداری ولتاژ مختص شبکه‌های توزیع شعاعی استفاده خواهیم کرد.

۳-۷ محدودیت توانایی در تحویل توان

در این بخش به بررسی یک چالش اساسی پیش روی ورود PV به شبکه توزیع برق پرداخته می‌شود. منابع تولید پراکنده‌ای چون PV به‌طور مرسوم با ضریب توان‌های نزدیک به یک به شبکه ادغام می‌شوند. از این رو نصب PV بر قابلیت سطح بارگذاری شبکه توزیع تأثیر مستقیمی دارد؛ چراکه با تأمین توان حقیقی بار توسط PV، بخش بزرگ‌تری از توان ظاهری جابجا شده در خطوط توزیع به صورت توان موهومی خواهد بود و توانایی خطوط در تأمین توان موهومی نیز بستگی به مقدار تقاضای توان حقیقی دارد. با در نظر گرفتن سیستم دو گره شکل (۳-۲۱)، می‌توان تحلیل جامعی برای تئوری پایداری ولتاژ

از نظر محدودیت در توانایی تحویل توان^۱ ارائه کرد [۳۷]. ابتدا در این بخش روابط لازم را بدون حضور PV به دست خواهیم آورد و سپس تأثیر نصب PV و هرگونه منبع تولید پراکنده‌ای را تحلیل خواهیم کرد.



شکل (۳-۲۱): مدار معادل سیستم دو گره

شکل (۳-۲۱) یک مدار معادل از سیستم ۲ گره را با امپدانس معادل Z_s و نیروی محرکه القایی V_s نشان می‌دهد. با توجه به لحاظ مقدار مقاومت در برابر اندوکتانس در مدل خط، از این سیستم برای تحلیل شبکه‌های توزیع برق نیز می‌توان استفاده کرد.

طبق KVL، ولتاژ در گره سمت دریافت‌کننده طبق رابطه (۳-۱) قابل محاسبه است:

$$\vec{V}_r = \vec{V}_s - \vec{Z}_s * \vec{I}_r \quad (۳-۱)$$

$$Z_s = \frac{(S_s^p - S_r^p) * |V_s|^2}{(P_s^2 + Q_s^2)} \quad (۳-۲)$$

$$V_r = \frac{Z_r}{Z_s} \frac{V_s}{[1 + (Z_r/Z_s)^2 + 2(Z_r/Z_s)\cos(\beta)]^{0.5}} \quad (۳-۳)$$

$$S_r = \frac{Z_r}{Z_s} \frac{(V_s)^2 / Z_s}{[1 + (Z_r/Z_s)^2 + 2(Z_r/Z_s)\cos(\beta)]} \quad (۳-۴)$$

¹ Loadability Limits

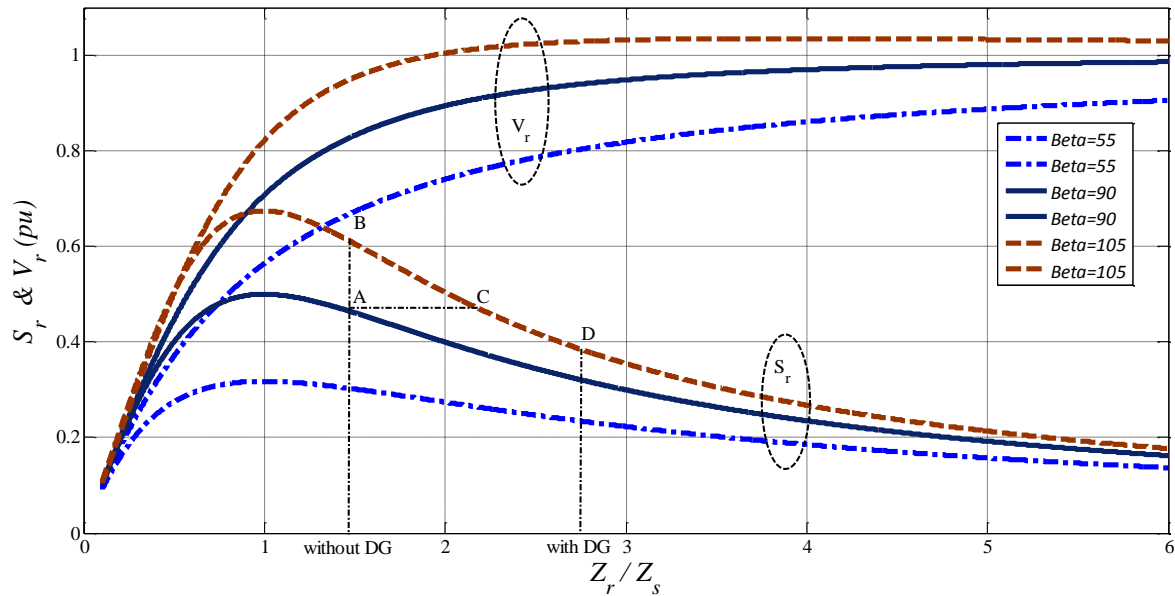
Z_s^p امپدانس معادل خط منتهی شده به هر گره از ابتدای فیدر^۱ است و طبق (۳-۲) محاسبه می‌گردد. با جایگذاری مقدار جریان I_r^p در رابطه (۳-۱)، ولتاژ و توان ظاهری سمت دریافت‌کننده مطابق با روابط (۳-۳) و (۳-۴) به دست می‌آید. با افزایش درخواست توان بار، اندازه Z_r کاهش می‌یابد و اندازه جریان I_r افزایش خواهد یافت. طبق روابط (۳-۳) و (۳-۴)، بارگذاری منجر به کاهش ولتاژ V_r و کاهش توان ظاهری دریافتی S_r در گره دریافت‌کننده می‌شود. اختلاف فاز بین امپدانس‌های Z_r و Z_s (Beta) برابر است با:

$$\beta = \theta - \phi \quad (۵-۳)$$

شکل (۳-۲۲) نمایش گرافیکی از روابط (۳-۳) و (۳-۴) را به ازای حالت‌های مختلف بار و برای فرض اولیه $|Z_s|=1$ و $|V_s|=1$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳-۲۲) دیده می‌شود، ماکزیمم توان انتقالی به بار در $\frac{Z_r}{Z_s}=1$ است. به‌طور کلی، مقدار نسبت $\frac{Z_r}{Z_s}$ باید همواره بزرگ‌تر از یک باشد. این بدان معنی است که افزایش ناگهانی در اندازه Z_s یا کاهش ناگهانی در اندازه Z_r باید به‌گونه‌ای باشد که سبب ناپایداری کل شبکه نگردد. همچنین به‌منظور داشتن پاسخ قابل قبول، همواره باید اندازه V_r بسیار بالا باشد. همان‌طور که شکل (۳-۲۲) نشان می‌دهد، در ناحیه سمت راست مقدار $\frac{Z_r}{Z_s}=1$ ، افزایش توان DG باعث کاهش زاویه β به خاطر افزایش نهایی ϕ در طرف بار طبق رابطه (۳-۶) خواهد گردید. به‌طور عکس در این ناحیه اگر مقدار توان DG در گره سمت مصرف‌کننده کاهش یابد، مقدار β طبق (۳-۶) افزایش خواهد یافت.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Q_r}{P_r - P_{DG}} \quad (۶-۳)$$

^۱ Feeder



شکل (۳-۲۲): منحنی قابلیت بارگذاری و ولتاژ سمت دریافت کننده

همان طور که در شکل (۳-۲۲) دیده می‌شود، با کاهش مقدار توان درخواستی بار و یا ادغام توان DG در سمت مصرف کننده، پروفایل ولتاژ بهبود می‌یابد. اما سؤال اساسی هنوز مطرح است که آیا مقدار توان انتخابی DG برای نصب، اثر نامطلوب بر پایداری ولتاژ سیستم داشته است؟ با رجوع به منحنی‌های S_r در شکل (۳-۲۲) دیده می‌شود که قابلیت بارگذاری و در نتیجه پایداری سیستم با قرار دادن مقدار نامطلوب DG از نقطه‌ای مانند B به کمتر از D کاهش یافته است. هرچه به مقدار توان DG اضافه شود، نسبت $\frac{Z_r}{Z_s}$ بزرگ تر خواهد شد. نتایج طبق شکل (۳-۲۲) نشان می‌دهند که بهترین ظرفیت برای نصب DG، مقداری است که با ادغام آن $\frac{Z_r}{Z_s} = 1$ شود.

۳-۸ شاخص پایداری ولتاژ

برای بررسی تأثیر PV بر پایداری ولتاژ در این پایان نامه، PV به شکل بار ولی با علامت منفی در نظر گرفته می‌شود. تاکنون برای مطالعه و تحقیق، برخی مراجع از در نظر گرفتن بار با علامت منفی

به‌عنوان DG در شبکه استفاده کرده‌اند [۳۸]. طبق مرجع [۳۹]، برای یک شبکه توزیع دو گره مانند شکل (۳-۱۳) شاخص پایداری ولتاژ با در نظر گرفتن تولید پراکنده در ضریب توان واحد به‌صورت زیر به دست می‌آید:

با استفاده از معادله پخش بار (۳-۷) و تبدیل آن به دو بخش حقیقی و موهومی داریم:

$$\vec{V}_r = \vec{V}_s - \vec{Z}_s * \vec{I}_r \quad (۷-۳)$$

$$V_s V_r \cos(\delta) = |V_r|^2 + [R_s(P_r - P_{DG}) + X_s Q_r] \quad (۸-۳)$$

$$V_s V_r \sin(\delta) = [X_s(P_r - P_{DG}) - R_s Q_r] \quad (۹-۳)$$

که زاویه $\delta = \delta_s - \delta_r$ اختلاف بین زاویه گره ابتدایی در فیدر و زاویه گره دریافت‌کننده توان است. با توجه به اینکه $\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1$ است، با حذف زاویه δ از دو معادله (۳-۸) و (۳-۹) داریم:

$$|V_r|^4 + \{2[R_s(P_r - P_{DG}) + X_s Q_r] - |V_s|^2\} |V_r|^2 + \{(R_s^2 + X_s^2)[(P_r - P_{DG})^2 + Q_r^2]\} = 0 \quad (۱۰-۳)$$

اکنون طبق روش حل معادلات درجه دوم، ولتاژ گره سمت گیرنده توان طبق رابطه (۳-۱۱) قابل محاسبه است.

$$|V_r|^2 = \frac{\{ |V_s|^2 - 2[R_s(P_r - P_{DG}) + X_s Q_r] \} \pm \sqrt{\Delta}}{2} \quad (۱۱-۳)$$

که در رابطه (۳-۱۱):

$$\Delta = \{2[R_s(P_r - P_{DG}) + X_s Q_r] - |V_s|^2\}^2 - 4\{(R_s^2 + X_s^2)[(P_r - P_{DG})^2 + Q_r^2]\} \quad (۱۲-۳)$$

برای داشتن پاسخ قابل قبول در گره گیرنده توان باید $\Delta \geq 0$ باشد. بنابراین رابطه (۳-۱۳) باید برقرار

باشد.

$$\left\{ |V_s|^2 - 2[R_s(P_r - P_{DG}) + X_s Q_r] \right\}^2 \geq 4 \left\{ (R_s^2 + X_s^2) [(P_r - P_{DG})^2 + Q_r^2] \right\} \quad (13-3)$$

رابطه (۱۳-۳) را می‌توان به صورت (۱۴-۳) توسعه داد:

$$L_k = \frac{2\sqrt{\left\{ (R_s^2 + X_s^2) [(P_r - P_{DG})^2 + Q_r^2] \right\}}}{\left| |V_s|^2 - 2\{R_s(P_r - P_{DG}) + X_s Q_r\} \right|} \leq 1 \quad (14-3)$$

که L_k به عنوان شاخص پایداری و لتاژ^۱ برای تعیین وضعیت پایداری گره‌های شبکه توزیع تعریف می‌گردد [۳۹]. فروپاشی و لتاژ زمانی که مقدار این شاخص به ۱ می‌رسد، در گره مربوطه اتفاق خواهد افتاد و هرچه مقدار این شاخص کمتر از ۱ باشد، آن گره کمتر تحت تأثیر ناپایداری و لتاژ خواهد بود. برای درک صحیحی از شاخص پایداری و لتاژ با ذکر یک مثال این فصل را خاتمه می‌دهیم.

۳-۸-۱ تعریف مقدار نفوذ PV

با توجه به اینکه ملاکی برای تعیین مقدار ادغام توان PV به شبکه داشته باشیم، در این پایان‌نامه مقدار نفوذ PV به این صورت تعریف می‌شود:

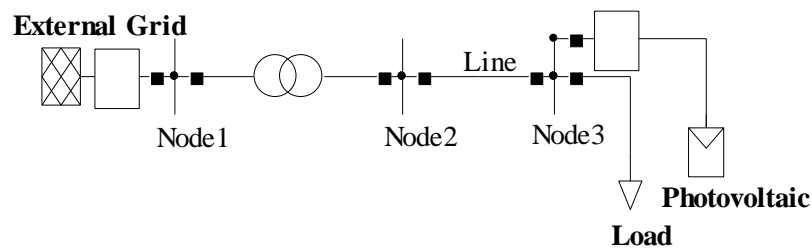
"میزان نفوذ عبارت است از مقدار توان PV نصب شده در هر گره، نسبت به توان بار متصل شده به همان گره". به عنوان مثال طبق این تعریف، با ادغام ۱۵ کیلووات PV در یک گره با بار متصل شده به میزان ۱۰۰ کیلووات، نفوذ ۱۵٪ است.

با توجه به این تعریف می‌توان صرف نظر از مقدار PV، در هر مکان از شبکه با توجه به مقدار بار در هر گره و در هر فاز، تأثیر PV بر پایداری و لتاژ را بررسی نمود.

¹ Voltage Stability Index

مثال ۱:

با فرض یک شبکه نمونه طبق شکل (۳-۲۳)، تحلیل پایداری را با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ L_k طبق رابطه (۳-۱۴) انجام می‌دهیم. اطلاعات بار این شبکه با فرض اولیه ولتاژ در سطح ۴۰۰ ولت، در جدول (۳-۱) آمده است. همان‌طور که جدول (۳-۱) نشان می‌دهد، با توجه به اندازه بار در سمت مصرف‌کننده در هر فاز، تأثیر مقدار توان حقیقی و موهومی بار بر پایداری ولتاژ شبکه، طبق شاخص پایداری محاسبه شده است. به همین منظور توسعه بار در فاز B نسبت به فاز A فقط در توان موهومی، و در فاز C نسبت به فاز A فقط در توان حقیقی در نظر گرفته شده است. همچنین در محاسبه شاخص به منظور مطالعه بیشتر، تأثیر ویژگی خط توزیع (نسبت R/X) بر پایداری ولتاژ شبکه لحاظ می‌شود. بنابراین، در جدول (۳-۲) مقادیر شاخص پایداری ولتاژ به ازای یک مقدار ثابت (۳/۱۲ اهم) برای امپدانس خط در نسبت‌های متفاوتی از R/X خط محاسبه شده است.



شکل (۳-۲۳): سیستم توزیع معادل در حضور PV

جدول (۳-۱): اطلاعات بار شبکه نمونه شکل (۳-۲۳)

اطلاعات بار	فاز C	فاز B	فاز A
توان حقیقی	۲۵۰ کیلووات	۱۵۰ کیلووات	۱۵۰ کیلووات
توان موهومی	۷۵ کیلووار	۱۲۵ کیلووار	۷۵ کیلووار

فصل سوم: تحلیل پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع با حضور منابع خورشیدی

جدول (۳-۲): وضعیت پایداری ولتاژ با و بدون حضور PV در فاز A

شاخص L_k برای فاز A			PV نفوذ
$r/x = 1/2$	$r/x = 0/5$	$r/x = 0/33$	
0/0663	0/0691	0/0696	0%
0/0449	0/0462	0/0464	40%
0/0301	0/0306	0/0306	80%
0/0276	0/0278	0/0278	100%

جدول (۳-۳): وضعیت پایداری ولتاژ با و بدون حضور PV در فاز B

شاخص L_k برای فاز B			PV نفوذ
$r/x = 1/2$	$r/x = 0/5$	$r/x = 0/33$	
0/0782	0/0819	0/0826	0%
0/0598	0/0618	0/0622	40%
0/0485	0/0495	0/0496	80%
0/0465	0/0471	0/0472	100%

جدول (۳-۴): وضعیت پایداری ولتاژ با و بدون حضور PV در فاز C

شاخص L_k برای فاز C			PV نفوذ
$r/x = 1/2$	$r/x = 0/5$	$r/x = 0/33$	
0/1087	0/1160	0/1175	0%
0/0663	0/0691	0/0696	40%
0/0339	0/0346	0/0347	80%
0/0276	0/0278	0/0278	100%

با توجه به مقادیر شاخص در نفوذهای مختلف PV طبق جدول‌های (۳-۲) تا (۳-۴)، در نسبت‌های پایین R/X با ثابت بودن امپدانس کل خط، وضعیت پایداری سیستم ضعیف‌تر است (مقدار شاخص در این حالت نسبت به سایر موارد به یک نزدیک‌تر است). نتایجی را که می‌توان از این بخش

گرفت به شرح زیر هستند:

۱. ادغام PV در سمت مصرف‌کنندگان شبکه، تأثیر مستقیمی بر پایداری ولتاژ دارد، پایداری ولتاژ در مورد مثال ۱ در نفوذهای مختلف PV در تمامی فازها بهبود یافت.

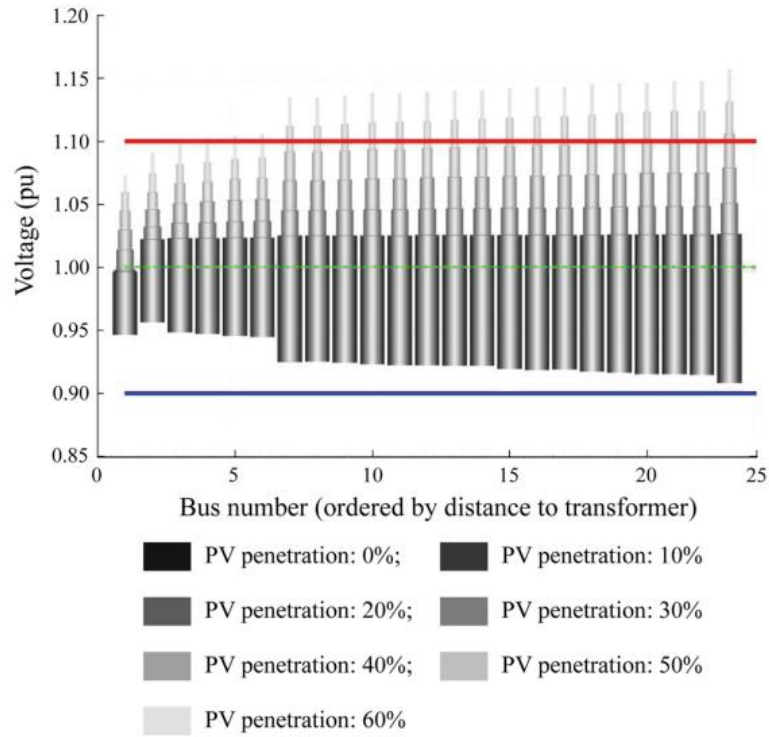
۲. همان‌طور که در فصل دوم بخش ۲-۶ نیز اشاره شد، در اثر بارگذاری از حاشیه پایداری ولتاژ شبکه‌های پسیو کم می‌شود. تأثیر منفی توسعه سیستم در مقدار تقاضای بار حقیقی بر پایداری ولتاژ را به‌طور کامل می‌توان با نصب PV از بین برد. جدول (۲-۳) و (۳-۴) نشان دادند که با توسعه بار حقیقی سیستم از ۱۵۰ کیلووات به ۲۵۰ کیلووات، مقدار شاخص بدون PV حکایت از تأثیر منفی در پایداری دارد چراکه شاخص به یک نزدیک‌تر شده است؛ همچنین با استفاده از PV در نفوذ ۱۰۰٪ سطح پایداری دو فاز A و C با یکدیگر برابر شدند (مقدار شاخص با نصب ۱۵۰ کیلووات در فاز A و نصب ۲۵۰ کیلووات در فاز C).

۳. مانند بارهای حقیقی، توسعه موهومی بار نیز تأثیری منفی بر پایداری دارد که در مورد مثال ۱ با نصب PV اثر منفی توسعه موهومی بار را می‌توان تا مقدار قابل توجهی طبق جدول (۳-۳) بهبود داد، حال آنکه در نفوذ PV تا ۱۰۰٪ نیز مقدار شاخص در فاز B بیشتر از فاز A است؛ چراکه با تولید توان حقیقی PV تأثیر توسعه توان موهومی بار به‌طور کامل برطرف نمی‌شود.

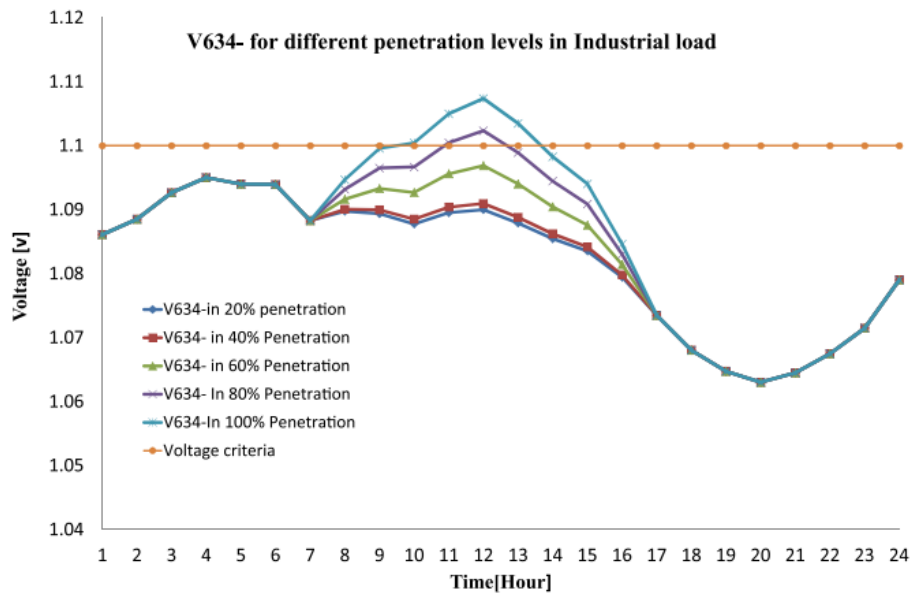
۳-۹ تأثیر نفوذ PV بر ولتاژ شبکه‌های توزیع

یکی از مسائل جدید پیش روی نصب PV در سیستم‌های توزیع برق، تأثیری است که این منابع بر دامنه ولتاژ مجاز بهره‌برداری از شبکه می‌گذارد. نتایج تحقیقات محققان حاکی از آن است که استفاده از توان PV با مقادیر بالای نفوذ آن در شبکه توزیع، دامنه ولتاژ را افزایش داده (حتی بیشتر از ۱/۰ pu) و

شبکه با اضافه ولتاژ مواجه شده است [۴۰, ۴۱].

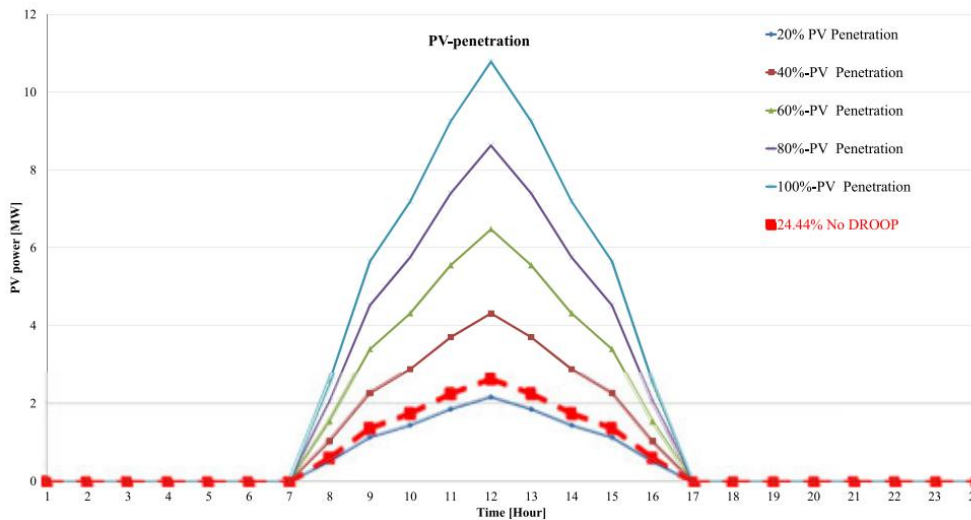


شکل (۳-۲۴): تأثیر نفوذهای مختلف PV بر وضعیت پروفایل ولتاژ شبکه [۴۰]

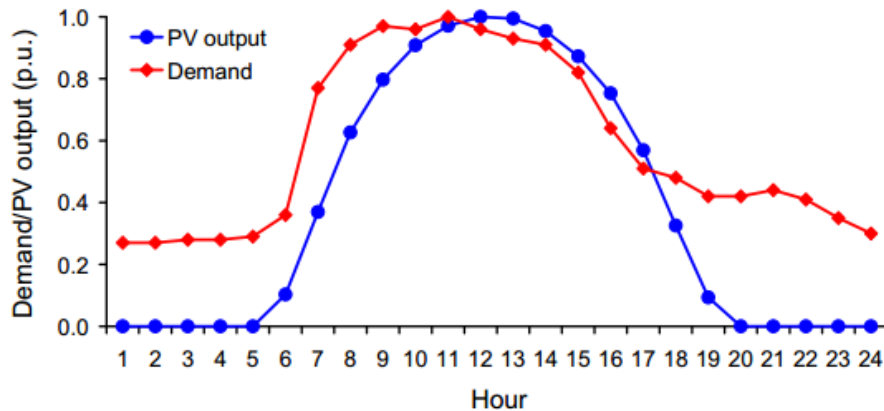


شکل (۳-۲۵): تأثیر نفوذهای مختلف PV بر ولتاژ گره ۶۳۴ از شبکه مورد استفاده در [۴۱] طی یک شبانه‌روز

همان‌طور که شکل‌های (۳-۲۴) و (۳-۲۵) نشان می‌دهند، با افزایش ضریب نفوذ PV و بالا بردن سطح تولید توان توسط این منابع به نسبت بار در شبکه، ولتاژ شبکه افزایش می‌یابد. شکل (۳-۲۵) وضعیت ولتاژ یکی از گره‌های شبکه بکار گرفته شده را تا مقدار نفوذ ۱۰۰٪ و با در نظر گرفتن تغییر توان PV در طی یک شبانه‌روز بررسی کرده است. بر همین اساس، از شکل (۳-۲۶) به‌عنوان مدلی از تغییر توان PV بر اساس تابش روزانه در نفوذهای مختلف استفاده کرده است [۴۱]. مراجع [۴۲، ۴۳] نیز در همین راستا به بررسی تغییر توان PV طی یک شبانه‌روز پرداخته‌اند و تغییر توان خروجی PV را بر این اساس با مدت زمان ۲۴ ساعته پیوند زده‌اند. همان‌طور که شکل (۳-۲۷) نشان می‌دهد، بدیهی است که در طی شب، توان تولیدی PV به صفر و در طی روز و بهترین شرایط مقدار تولید به حد نامی خود (۱ pu) برسد. این مدل توانسته است که بر اساس مشخصات آرایه‌های خورشیدی، نقش PV به‌عنوان تولید پراکنده را بررسی کند.



شکل (۳-۲۶): تغییر توان PV در نفوذهای مختلف طی یک شبانه‌روز [۴۱]

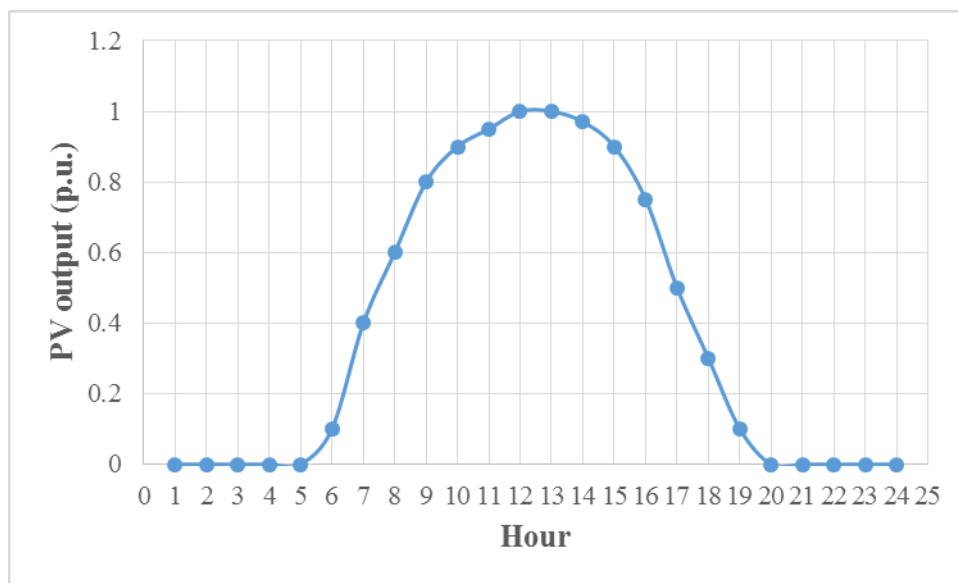


شکل (۳-۲۷): توان تولیدی PV بر حسب واحد، طی شبانه‌روز و تقاضای بار در [۴۳]

با توجه به مطالبی که در خصوص شکل‌های (۳-۲۴) و (۳-۲۵) ارائه گردید، مراجع [۴۰, ۴۱] اثر نفوذ بالای PV بر ولتاژ شبکه را نشان دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن مدل‌سازی مناسبی از PV در سطوح مختلف، طی یک شبانه‌روز، افزایش ولتاژ شبکه بر اثر نفوذ بالای PV را به عنوان یک چالش جدید معرفی کردند اما در این مقالات اثر نفوذ PV بر پایداری ولتاژ شبکه نادیده گرفته شده است؛ حال آنکه شکل (۳-۲۲) تأثیر مستقیم تولید پراکنده بر سطح قابلیت بارگذاری شبکه و به طبع آن پایداری ولتاژ را نشان داد. در فصل بعد، تمرکز ما بر روی تشریح این موضوع یعنی تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع در نفوذهای مختلف PV قرار خواهد داشت.

با توجه به مطالب و سابقه تحقیق که در این بخش بیان شد، از پیشنهاد شکل (۳-۲۸) به عنوان مدل PV در این پایان‌نامه استفاده خواهد شد. توان تولیدی PV طبق این مدل، بازه زمانی یک شبانه‌روز را در نظر می‌گیرد و برای هر ضریب نفوذی از PV در بحرانی‌ترین گره محاسبه خواهد شد. همان‌طور که شکل (۳-۲۵) نشان می‌دهد، با افزایش ضریب نفوذ PV، ولتاژ شبکه افزایش می‌یابد؛ از طرفی دیگر، طبق شکل (۳-۲۲) اگر مقدار توانی که از PV به شبکه تزریق می‌شود موجب $\frac{Z_r}{Z_s}$ بزرگ‌تر از یک شود، از قابلیت بارگذاری و به طبع آن پایداری ولتاژ شبکه کاسته خواهد شد، اما طبق شکل (۳-۲۸) تأثیر منفی

آن بر پایداری ولتاژ فقط در ساعاتی خواهد بود که توان تولیدی آن در حوالی مقدار نامی باشد.



شکل (۳-۲۸): مدل پیشنهادی برای PV طی مدت زمان یک شبانه‌روز

۳-۱۰ نامتعادلی سیستم‌های توزیع

در این بخش سعی بر آن است که یکی دیگر از چالش‌های پیش روی اتصال منابع خورشیدی به شبکه‌های توزیع برق، مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. ادغام PV به شبکه در گره‌های سه فاز به صورت متعادل و سه فاز می‌تواند در نظر گرفته شود، حال آنکه هیچ الزامی برای همه مصرف‌کنندگان در نوع استفاده از توان PV به صورت سه فاز وجود ندارد و ممکن است از PV به صورت تک فاز بهره‌برداری شود و یا به طور کلی تعدادی از مصرف‌کنندگان فقط دسترسی به خطوط تک فاز سیستم توزیع داشته باشند. یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر تلفات سیستم‌های توزیع به دلیل جریان دار شدن سیم نول است.

از روش‌های بهبود نامتعادلی و تلفات سیستم‌های توزیع که اخیراً مورد توجه محققان واقع شده، استفاده از منابع تولید پراکنده تک فاز جهت بهبود نامتعادلی در شبکه برق است [۴۴]. مرجع [۴۴] به بررسی ارزیابی عدم تعادل ولتاژ در شبکه‌های توزیع شعاعی ثانویه با حضور منابع PV تک فاز پرداخته و

حساسیت و عدم تعادل ولتاژ برای حداکثر اندازه‌های مختلف از PV تک فاز (SPPVS)^۱ با سطوح مختلف نفوذ PV در یک شبکه معمولی توزیع شعاعی را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. گارسیا و همکارانش نیز یک روش ارزیابی عددی برای حداقل کردن نامتعادلی ولتاژ ارائه کردند و در تحقیقات آن‌ها، حساسیت پارامترهای شبکه بر نامتعادلی مورد بررسی قرار گرفت [۴۵].

۳-۱۰-۱ شاخص نامتعادلی

طبق تعریف IEC^۲ با استفاده از مؤلفه مثبت و منفی ولتاژ در هر گره می‌توان میزان نامتعادلی سیستم را مشخص کرد. IEC شاخص VUF^۳ را مطابق (۳-۱۵) این‌گونه معرفی می‌کند:

$$VUF\% = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (۳-۱۵)$$

در رابطه (۳-۱۵)، V_1 و V_2 به ترتیب توالی‌های منفی و مثبت ولتاژ هستند.

۳-۱۱ جمع‌بندی

با استفاده از روابط ریاضی در دو بخش اخیر این فصل، تأثیر PV بر قابلیت بارپذیری و وضعیت پایداری ولتاژ شبکه توزیع و چالش‌ها و اثرات مثبت و منفی ادغام PV به این شبکه‌ها مطالعه و بررسی شد. با انجام چند شبیه‌سازی از روابط ذکر شده، اثر PV بر قابلیت بارگذاری شبکه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان دادند که منابع تولید پراکنده‌ای چون PV، بر قابلیت بارگذاری یا همان پایداری ولتاژ هم تأثیری مثبت و هم منفی می‌تواند داشته باشد. در این فصل، جمع‌بندی مناسبی از مسئله پایداری ولتاژ، شاخص‌های پایداری و نحوه عملکرد صفحات خورشیدی در شبکه‌های توزیع ارائه شد. هدف ما

^۱ Single-Phase Photovoltaic System

^۲ International Electrotechnical Commission

^۳ Voltage Unbalance Factor

مطالعه و تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم‌های توزیع با حضور منابع خورشیدی است؛ بنابراین در فصل بعد شاخص پایداری (۳-۱۴) در کنار یک روش اساسی مطالعه پایداری ولتاژ (منحنی $v-p$) برای یک شبکه توزیع استاندارد IEEE تحلیل می‌شود. مطالعه تلفات، همواره بخش جدانشدنی از سیستم‌های توزیع برق است؛ از این رو در فصل بعد تأثیر PV بر پایداری ولتاژ تواما با بررسی تلفات صورت می‌گیرد. یکی از عوامل اصلی تلفات شبکه‌های توزیع، میزان نامتعادلی شبکه برق و جریان دار شدن سیم نول است، که در فصل بعد مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

۴ فصل چهارم

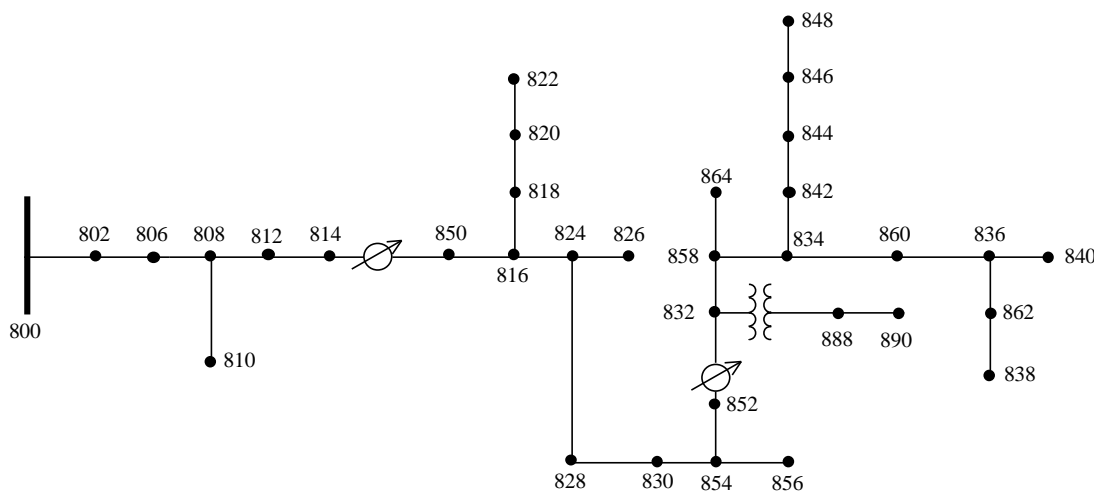
تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE با حضور PV

۱-۴ مقدمه

در فصل سوم، اثرات مثبت و منفی ادغام PV به شبکه‌های توزیع و چالش‌های پیش روی نصب این منابع در سطح توزیع بررسی شدند. در این فصل مطابق با هدف اصلی کار ما، پایداری ولتاژ و تلفات سیستم شعاعی توزیع برق ۳۴ گره IEEE با سطوح ولتاژ ۲۴/۹ و ۴/۱۶ کیلوولت و ادغام PV در نفوذهای مختلف، با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ L_k طبق رابطه (۳-۱۴) تحلیل و بررسی می‌شود و این روش برای هر سیستم توزیعی جوابگوست. برای تحلیل، مستندسازی و مقایسه نتایج، در کنار استفاده از شاخص پایداری ولتاژ از رسم منحنی‌های V-P نیز استفاده می‌شود.

۲-۴ انتخاب سیستم توزیع جهت تحلیل وضعیت پایداری

در این پایان‌نامه از سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE^۱ با اطلاعات موجود در انجمن مهندسان قدرت IEEE (PES)^۲ در [۴۶]، استفاده می‌شود. شکل (۴-۱) یک نمایش تک‌خطی از این شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱): شبکه توزیع ۳۴ گره IEEE [۴۶]

^۱ IEEE 34 Node Test Feeder

^۲ IEEE Power Engineering Society

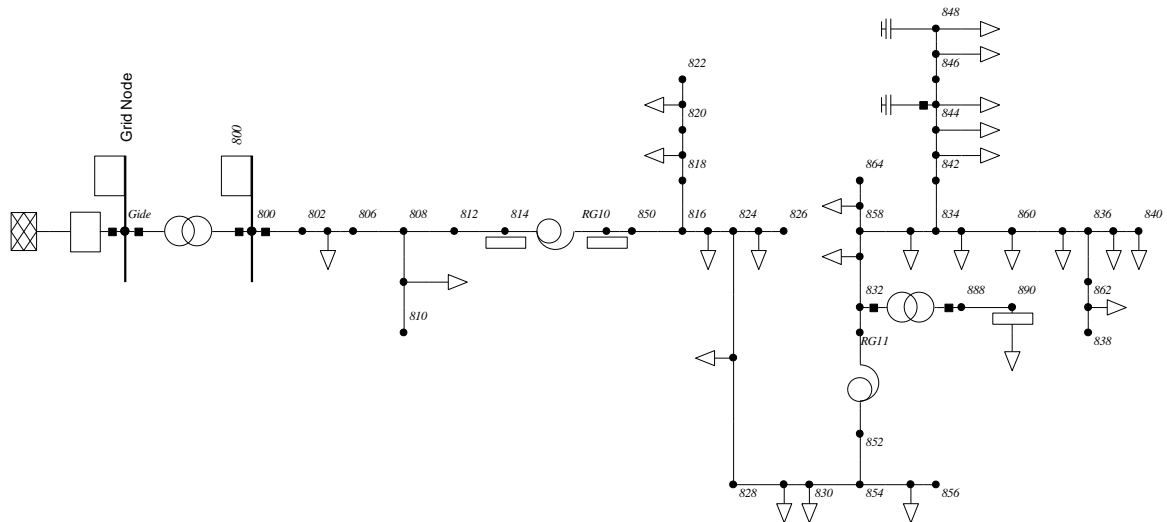
سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE، شبکه‌ای شعاعی، نامتعادل، با سطوح ولتاژ ۲۴.۹ کیلوولت و ۴.۱۶ کیلوولت، با کل بار ۱۰۴۷kw و ۶۷۷kvar به صورت متمرکز و ۷۲۲kw و ۳۶۷kvar به صورت توزیع شده در خطوط است. در این سیستم تعدادی از بارها به صورت متعادل و برخی به صورت نامتعادل از شبکه تغذیه می‌کنند. در این سیستم از ۲ رگلاتور ولتاژ و بانک خازنی نیز استفاده شده است. اطلاعات کامل از موقعیت و مقدار بارها، نوع بار و نحوه اتصال آن‌ها به شبکه، جزئیات ساختار خط و طول خطوط و اطلاعات مربوط به ترانسفورماتور در پیوست آ درج شده است. برای محاسبه سریع شاخص L_k در نفوذهای مختلف PV از روش پخش بار پس‌رو-پیش‌رو مختص سیستم‌های توزیع شعاعی استفاده می‌شود. جزئیات کاملی از این روش در [۴۸، ۴۷] آمده است. برای بررسی تلفات، رسم پروفایل ولتاژ و رسم دقیق منحنی‌های V-P از نرم‌افزار دیگسایلنت^۱ استفاده می‌شود. با استفاده از دیگسایلنت امکان بررسی تلفات هر سیستم نامتعادلی با در نظر گرفتن جریان سیم نول امکان‌پذیر است و میزان نامتعادلی شبکه توزیع در نفوذهای مختلف PV قابل محاسبه است.

۳-۴ شبیه‌سازی سیستم ۳۴ گره IEEE در دیگسایلنت

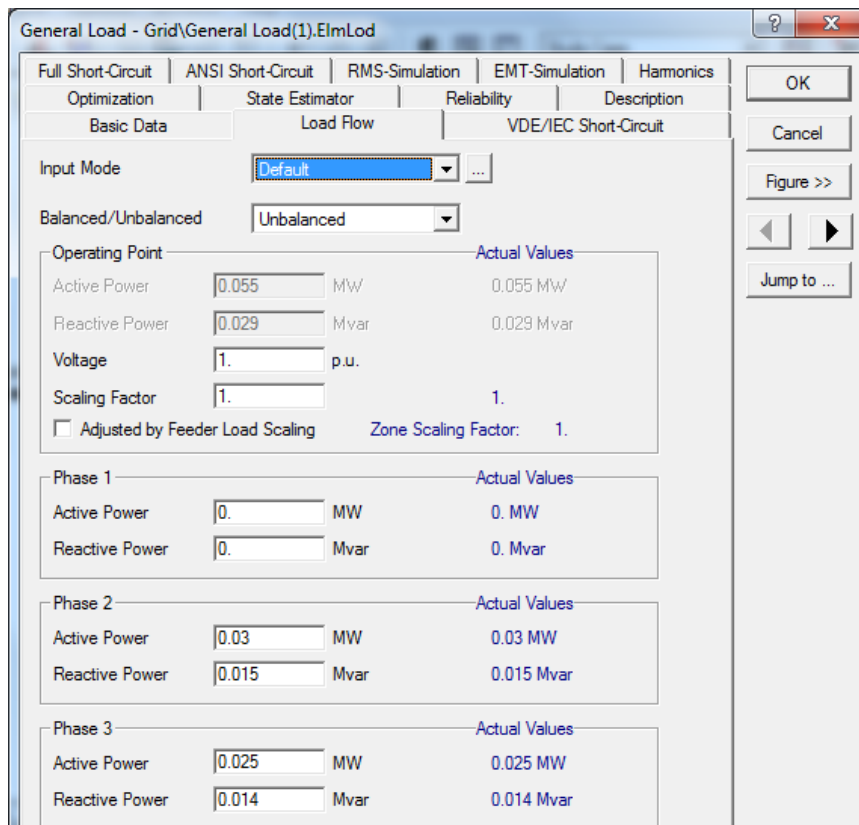
یکی از نرم‌افزارهای رایج و کاربردی جهت مطالعه سیستم قدرت در صنعت برق، نرم‌افزار دیگسایلنت است. در بخش تحلیل و شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت، نرم‌افزار دیگسایلنت قادر به تحلیل انواع پخش بار متعادل و نامتعادل، تحلیل انواع اتصال کوتاه متعادل و نامتعادل، تحلیل پیشامدهای اتفاقی، تحلیل انواع پایداری سیستم‌های قدرت (شبیه‌سازی پایداری گذرا و پایداری دینامیکی)، تحلیل حفاظت، تحلیل کیفیت توان، تحلیل هارمونیک شبکه، بهینه‌سازی شبکه توزیع، تحلیل قابلیت اطمینان، تحلیل شبکه‌های فشار ضعیف، مدل‌سازی تولیدات پراکنده و ... است. بخش قابل توجهی از شبیه‌سازی‌های این پایان‌نامه در محیط این نرم‌افزار انجام شده است. با استفاده از جزئیات دقیق و کامل سیستم ۳۴ گره در

¹ DIgSILENT

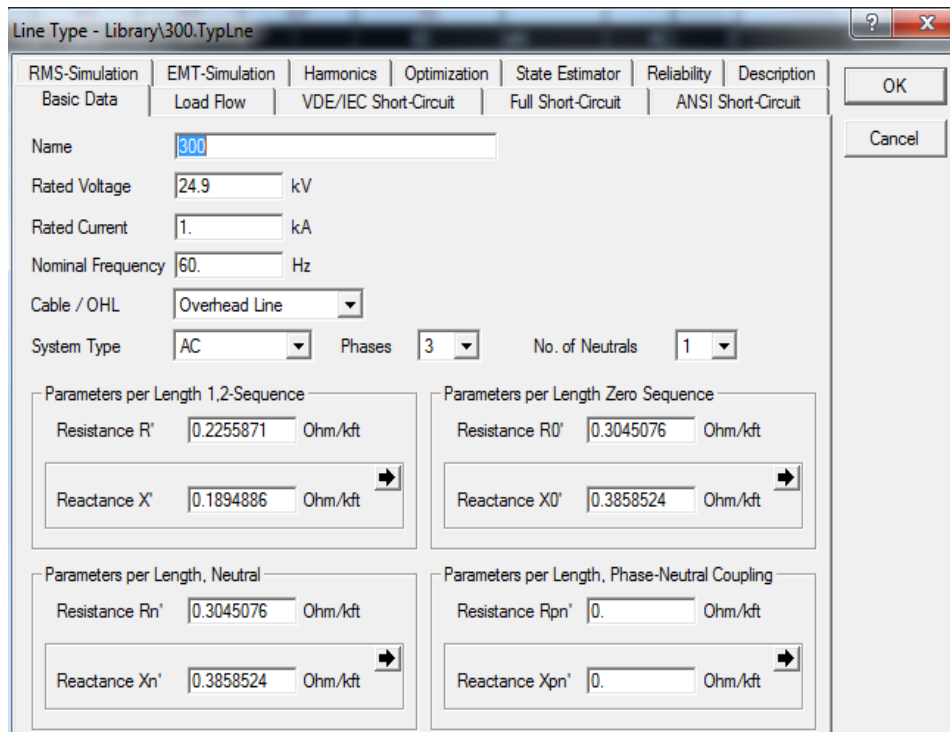
پیوست آ، شبکه در محیط دیگسایلنت طبق شکل (۲-۴) شبیه‌سازی شده است.



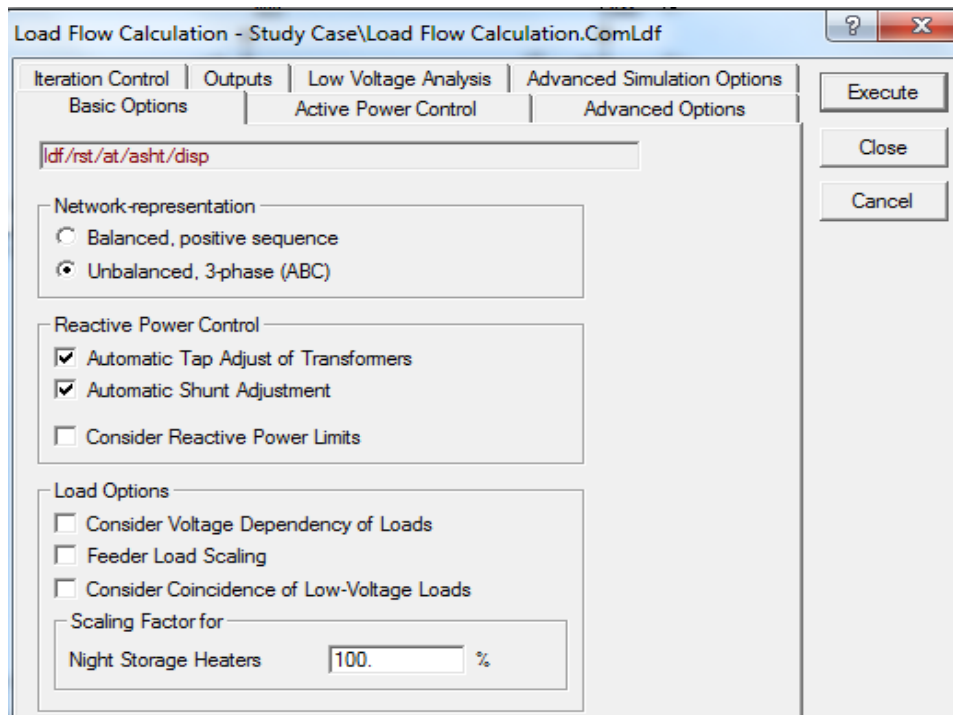
شکل (۲-۴): شبیه‌سازی سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE در محیط DiGSILENT



شکل (۳-۴): شیوه انجام تنظیمات بار در DiGSILENT



شکل (۴-۴): پارامترهای یک نمونه از مدل‌های خط، در DigSILENT

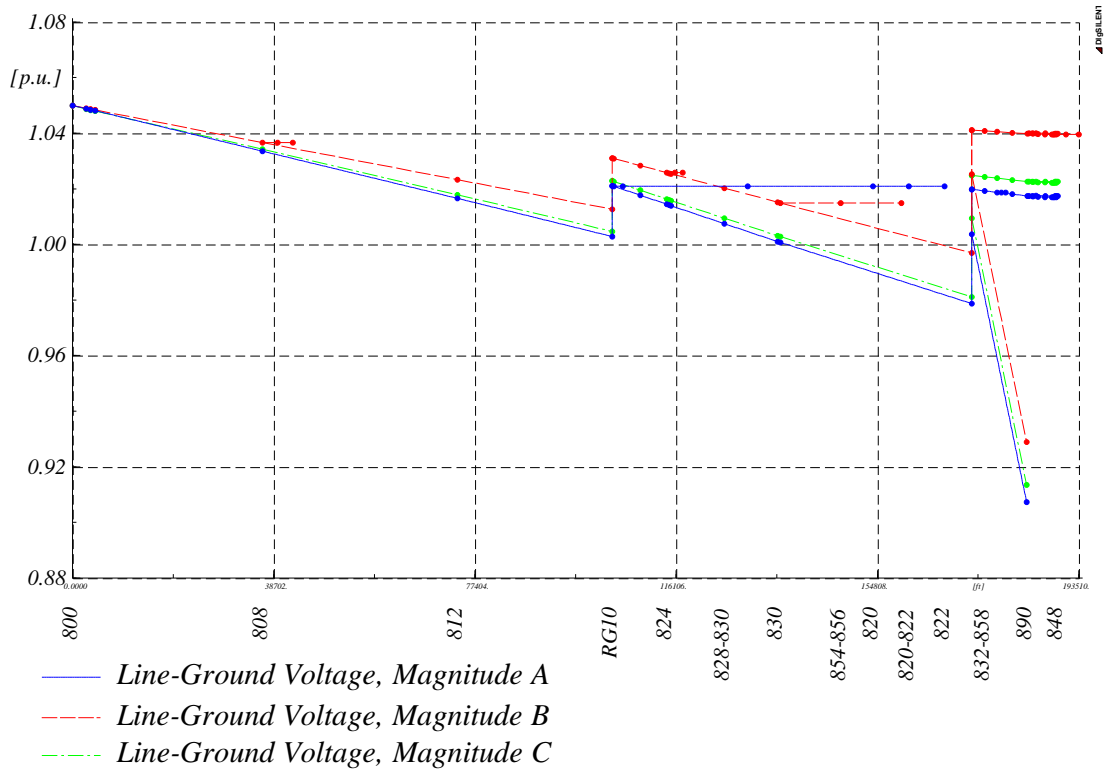


شکل (۴-۵): تنظیمات سربرگ پخش بار در DigSILENT

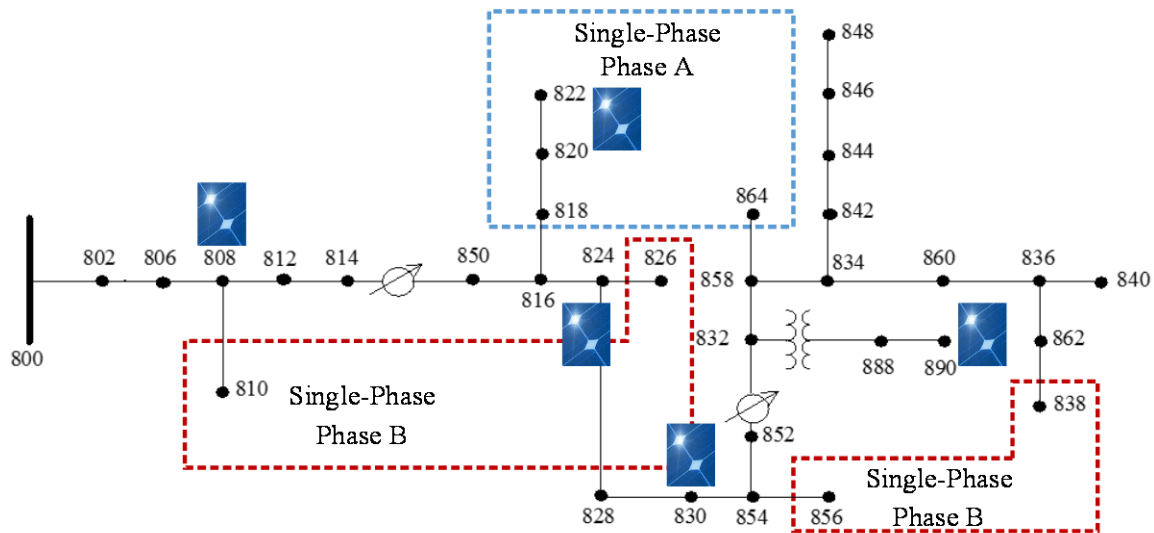
همان‌طور که شکل (۲-۴) نشان می‌دهد، محل قرارگیری بارهای توزیع‌شده در خطوط را به صورت مجتمع و در وسط خط بین دو گره قرار داده‌ایم. شکل‌های (۳-۴) و (۴-۴)، تنظیمات انجام گرفته در دیگسایلنت برای یک مدل بار و پارامترهای یکی از مدل‌های خط به کار رفته در شبکه با شماره ۳۰۰ را نشان می‌دهد. از این ساختار خط در کنار سایر ساختارهای در نظر گرفته شده برای خطوط در پیوست آ، در تعدادی از خطوط این شبکه استفاده شده است. همان‌طور که شکل (۳-۴) نشان می‌دهد، بارگذاری نامتعادل که در برخی از گره‌های این شبکه وجود دارد، با انتخاب قسمت مربوطه در شکل (۴-۳) در نرم‌افزار دیگسایلنت قابل انجام است. شکل (۵-۴) سربرگ پخش بار این شبکه در دیگسایلنت را نشان می‌دهد. در این قسمت نوع پخش بار به صورت شبکه ۳ فاز نامتعادل و تنظیم خودکار تپ چنجرهای زیر بار انتخاب شده است. با توجه به در نظر گرفتن نوع بار طبق بخش ۲-۹-۱، استفاده از معادلات جریان برای انجام پخش بار نیوتون-رافسون انتخاب شده است. ضرایب α و β در دیگسایلنت با عنوان‌های kpu و kqu برای همه بارها طبق اطلاعات پیوست آ در نظر گرفته شده است.

اکنون می‌توان با انجام پخش بار شبکه به بررسی وضعیت ولتاژ، تلفات و سایر نکات مهم در سیستم ۳۴ گره IEEE پرداخت. طبق شبیه‌سازی در دیگسایلنت، شکل (۶-۴) وضعیت پروفایل ولتاژ سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل (۶-۴) نشان می‌دهد، وضعیت ولتاژ از گره نخست در شبکه به بعد رو به کاهش است که البته این موضوع خلاف انتظار نیست. طبق شکل در محل رگلاتورهای ولتاژ وضعیت ولتاژهای هر کدام از فازهای A، B و C حداکثر تا مقدار مبنا (در این شبکه ۱۰۵ پرینیت) بهبود می‌یابد. در شکل (۶-۴) برای تعدادی از گره‌ها فقط منحنی‌های آبی و قرمز رنگ (فاز A و فاز B) وجود دارد که این موضوع دلالت بر برخی انشعاب‌های تک فاز سیستم دارد. انشعاب‌های تک فاز در سیستم ۳۴ گره IEEE مطابق با شکل (۷-۴) مشخص شده است.

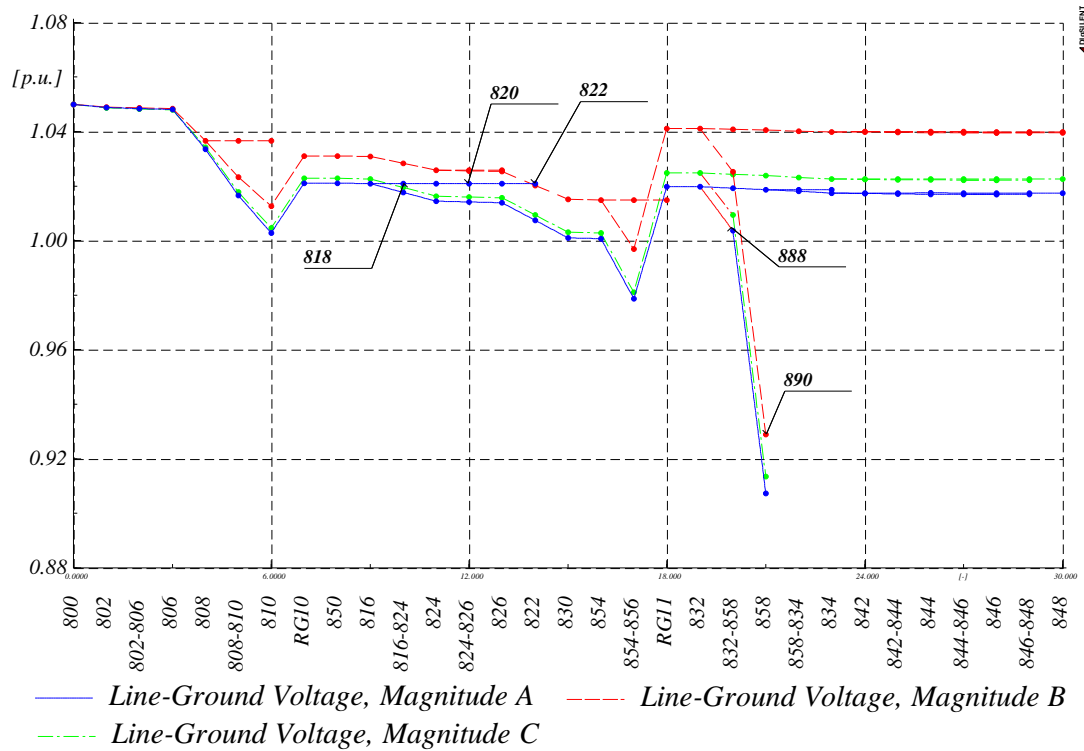
فصل چهارم: تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE با حضور PV



شکل (۴-۶): پروفایل ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE بر مبنای طول فیدر



شکل (۴-۷): انشعاب‌های تک فاز در سیستم ۳۴ گره IEEE



شکل (۴-۸): پروفایل ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE بر اساس شماره گره‌ها

شکل (۴-۶) یک نمایی کلی از وضعیت پروفایل ولتاژ سیستم ۳۴ گره از گره نخست تا انتهای شبکه را بر مبنای طول فیدر نشان می‌دهد و از این جهت گره‌های مهم توسط نرم‌افزار در محور طولی شکل (۴-۶) نمایش داده شده‌اند. با مرتب کردن نمایش گره‌ها در دیگسایلنت، شکل (۴-۶) را می‌توان به صورت شکل (۴-۸) نمایش داد. شکل (۴-۸) در یک نگاه با توجه به شماره هر گرهی از شبکه، وضعیت ولتاژ را در هر فاز برحسب پریونیت نشان می‌دهد. طبق هر دو شکل، بدترین وضعیت ولتاژ مربوط به گره ۸۹۰ است که با توجه به شکل (۴-۲) و (۴-۶) یکی از دلایل آن فاصله زیاد این گره از گره مرجع (گره ۸۰۰) و عدم دسترسی به بانک‌های خازنی موجود در انتهای شبکه است.

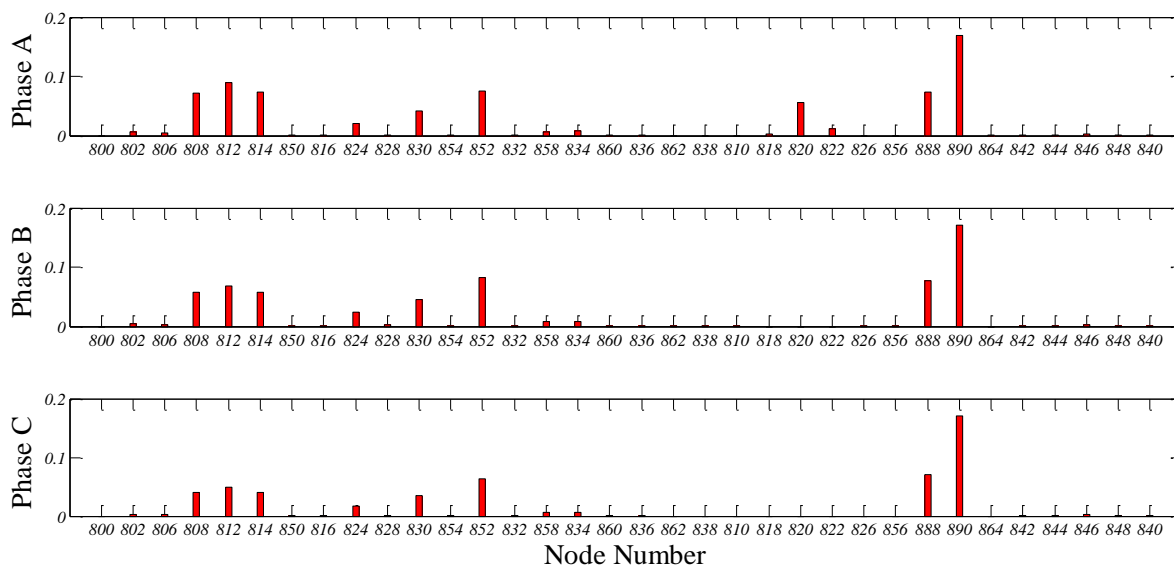
۴-۴ تحلیل وضعیت پایداری ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE

برای بررسی وضعیت پایداری ولتاژ در این بخش از دو روش استفاده می‌شود. روش نخست

استفاده از شاخص پایداری ولتاژ معرفی شده طبق رابطه (۳-۱۴) است. ابتدا شاخص پایداری ولتاژ L_k برای تمام گره‌های سیستم ۳۴ گره حساب خواهد شد و سپس به بررسی اثر PV بر پایداری سیستم توسط شاخص خواهیم پرداخت. روش دوم استفاده از منحنی‌های V-P است. در فصل دوم شیوه استفاده از این منحنی‌ها برای بررسی پایداری ولتاژ به تفصیل شرح داده شد.

۴-۴-۱ استفاده از شاخص پایداری ولتاژ

تحلیل ناپایداری ولتاژ یک مسئله دینامیکی در سیستم‌های قدرت است، ولی به منظور تخمین فاصله عملکرد سیستم تحت بار مشخص نسبت به نقطه زانویی در منحنی V-P، از تحلیل‌های استاتیکی نیز در سیستم می‌توان استفاده کرد. در این بخش، با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ L_k سطح پایداری ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE به دست می‌آید. شکل (۴-۹) وضعیت پایداری در هر فاز را طبق شاخص L_k بدون حضور PV در سیستم نشان می‌دهد. طبق رابطه شاخص، گره‌هایی از سیستم که مقدار شاخص در آن گره‌ها به یک نزدیک‌تر است، نسبت به سایر گره‌ها ضعیف‌تر به وقوع ناپایداری ولتاژ هستند.



شکل (۴-۹): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE بدون PV

همان‌طور که شکل (۴-۹) نشان می‌دهد، سیستم توزیع ۳۴ گره وضع پایداری مناسبی دارد، چراکه مقدار شاخص پایداری در آن به کمتر از 0.2 می‌رسد. طبق این شکل نتایجی به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

۱. گره‌های ۸۰۸، ۸۱۲، ۸۱۴، ۸۳۰، ۸۵۲، ۸۲۰، ۸۸۸ و ۸۹۰ نسبت به سایر گره‌های سیستم، ضعیف‌تر به ناپایداری هستند، چراکه شاخص برای این گره‌ها مقدار قابل توجه‌تری نسبت به سایر گره‌ها دارد.

۲. گره ۸۹۰ ضعیف‌ترین گره به ناپایداری ولتاژ نسبت به سایر گره‌ها در سیستم است، زیرا بیشترین مقدار شاخص مربوط به این گره است.

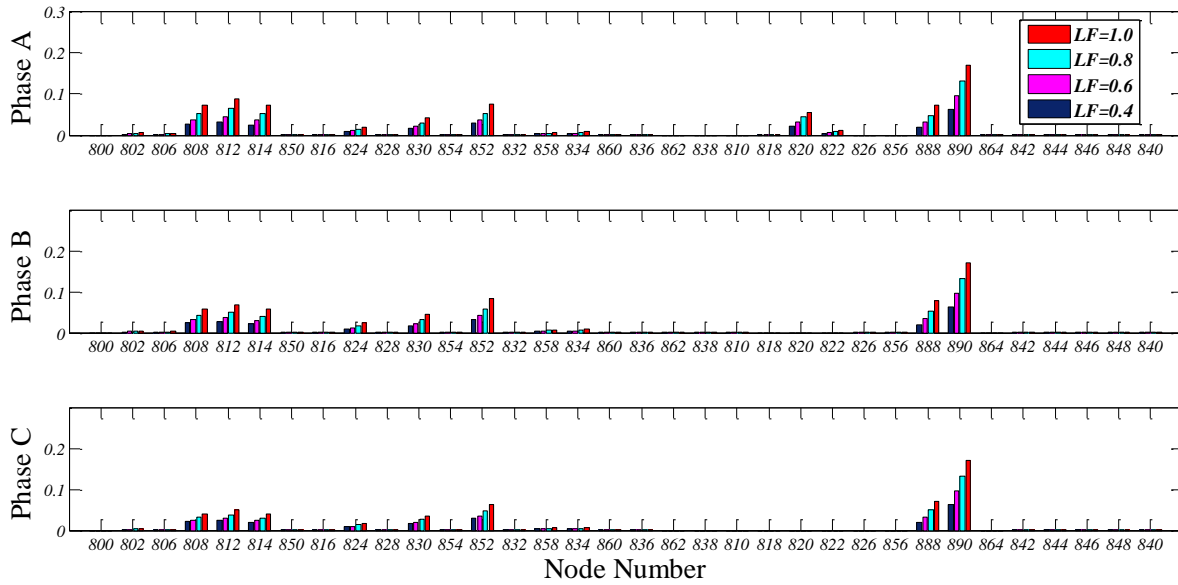
۳. در بعضی گره‌ها مقداری برای شاخص در یکی از فازها (مثل گره ۸۲۰ و ۸۲۲ در فاز A) وجود دارد که در سایر فازهای سیستم وجود ندارد. این نقاط گره‌های تک فاز سیستم طبق شکل (۴-۷) هستند.

طبق تعریف IEEE در بخش ۲-۶، مقدار بارگذاری و پروفایل بار بر پایداری ولتاژ تأثیر مستقیم دارد. برای مطالعه این موضوع طبق شاخص پایداری ولتاژ با در نظر گرفتن یک ضریب برای بار (LF^1) می‌توان تغییر پروفایل بار و اثر آن بر روی پایداری را مورد سنجش قرار داد. LF می‌تواند بسته به مقدار بار روزانه، سالیانه و مقدار تقاضای مصرف‌کنندگان شبکه توزیع، تغییر کند.

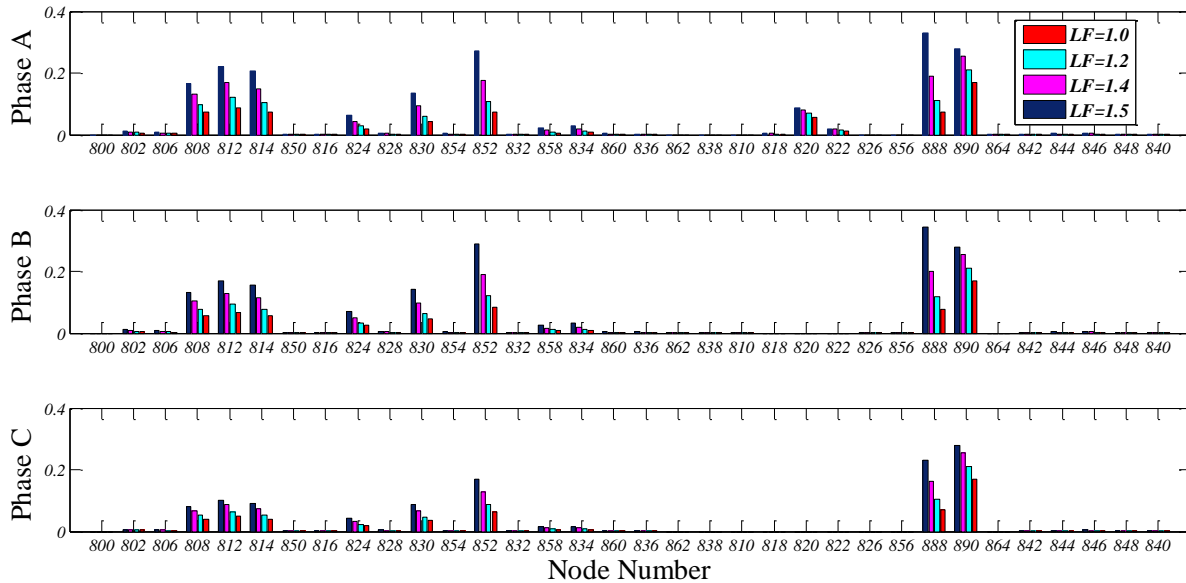
در این بخش تأثیر تغییر پروفایل بار به صورت ضریبی از کل بارهای موجود شبکه ۳۴ گره در نظر گرفته می‌شود. اگر LF برابر یا یک باشد، یعنی شبکه طبق اطلاعات بار مندرج در ضمیمه آ بارگذاری شده است. به‌طور مثال اگر LF برابر با ۲ شود، کل بار سیستم به‌صورت دو برابر در نظر گرفته شده است.

¹ Load Factor

توسعه بار در سیستم ۳۴ گره IEEE و تأثیری که بر پایداری دارد، طبق شکل (۴-۱۰) و (۴-۱۱) در ضرایب مختلفی از LF نشان داده شده است و بار کل سیستم با LF بین ۰/۴ تا ۱/۵ تغییر می‌کند.

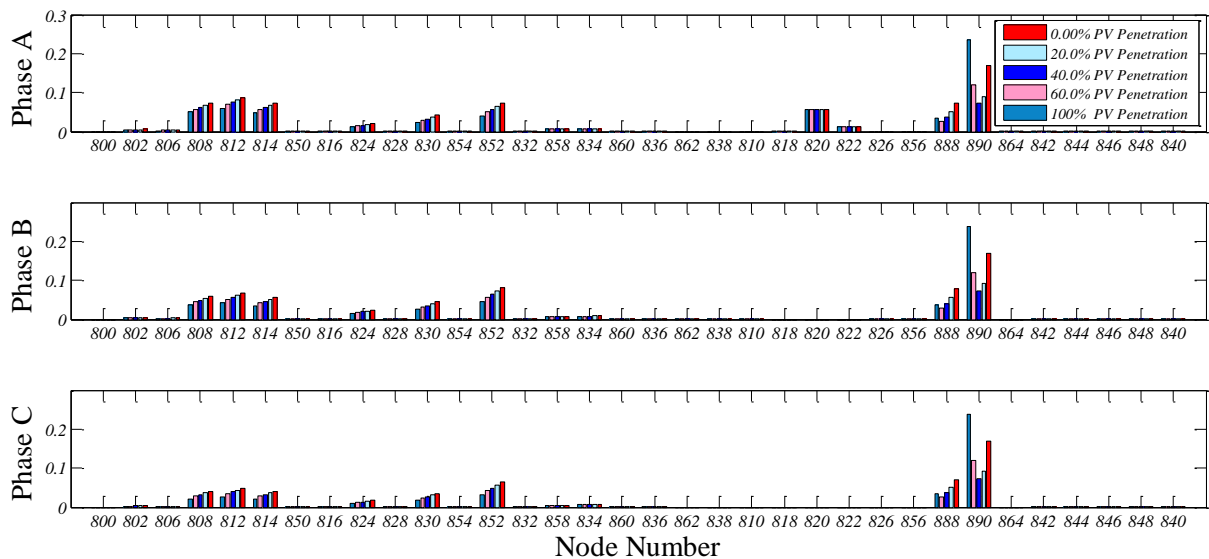


شکل (۴-۱۰): تأثیر کاهش پروفایل بار کل سیستم بر پایداری ولتاژ طبق شاخص پایداری ولتاژ L_k



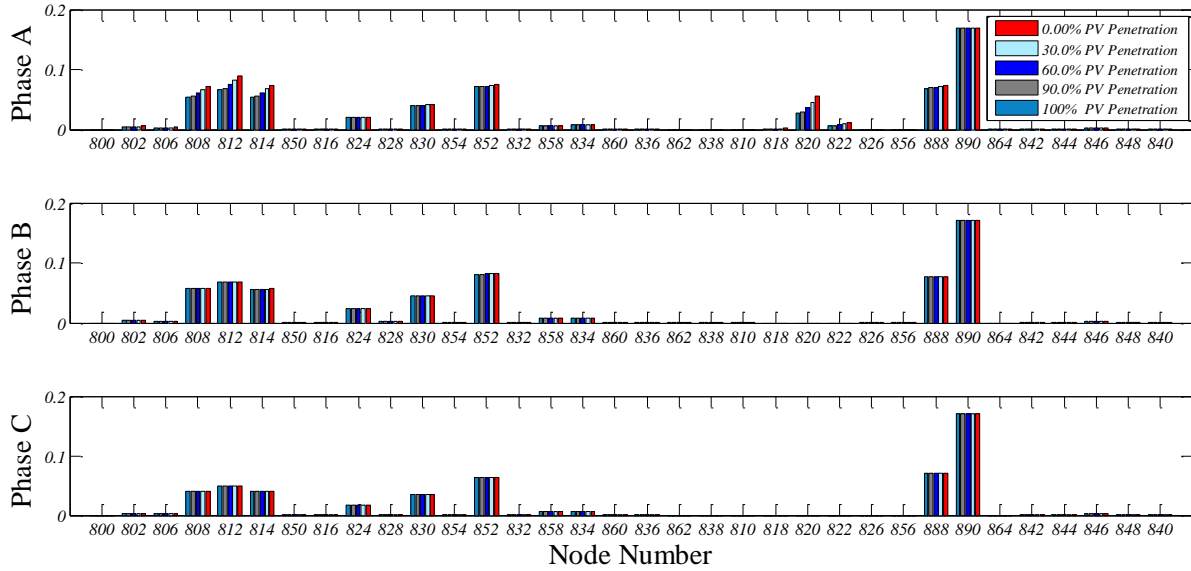
شکل (۴-۱۱): تأثیر افزایش پروفایل بار کل سیستم بر پایداری ولتاژ طبق شاخص پایداری ولتاژ L_k

طبق تعریف مقدار نفوذ PV در هر گره از شبکه در بخش ۳-۸-۱، می‌توان شاخص پایداری ولتاژ L_k در نفوذهای مختلف و مشخص PV را برای تمامی گره‌های شبکه توزیع ۳۴ گره IEEE محاسبه کرد. شکل‌های (۴-۱۲) تا (۴-۱۶) مقدار شاخص پایداری ولتاژ L_k را در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری سیستم ۳۴ گره IEEE (طبق نتیجه ۱) با نفوذهای مختلف PV در ضریب توان واحد نشان می‌دهند. طبق استانداردهای IEEE-1547 و IEEE-929، بهره‌برداری از واحدهای PV در سطح توزیع برای اهدافی مانند تنظیم ولتاژ با استفاده از روش تزریق توان موهومی به شبکه جایز نیست [۴۹، ۵۰]. در این استانداردها استفاده از PV در ضریب توان‌های بیشتر از ۰/۸۵ باید صورت گیرد. علاوه بر این، تولید توان موهومی از نظر مالی هیچ سودی را بازگشت نمی‌دهد، پس تولید توان حقیقی ترجیح داده می‌شود و بسیاری از سیستم‌های PV و کنترل مربوط به مبدل آنها روی تولید توان حقیقی است [۴۹].

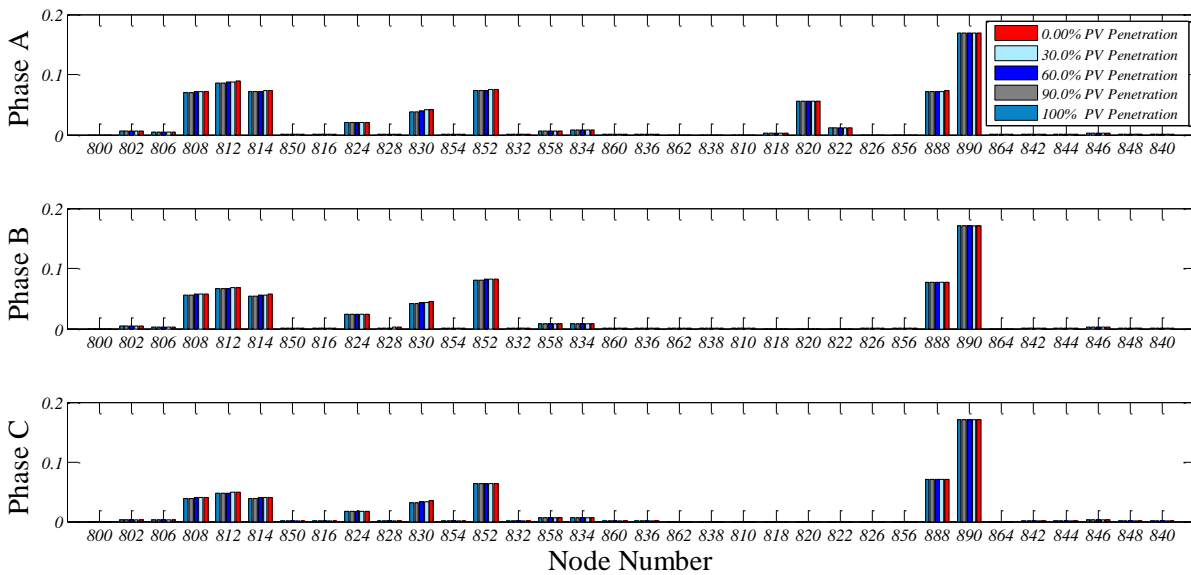


شکل (۴-۱۲): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۹۰

فصل چهارم: تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE با حضور PV

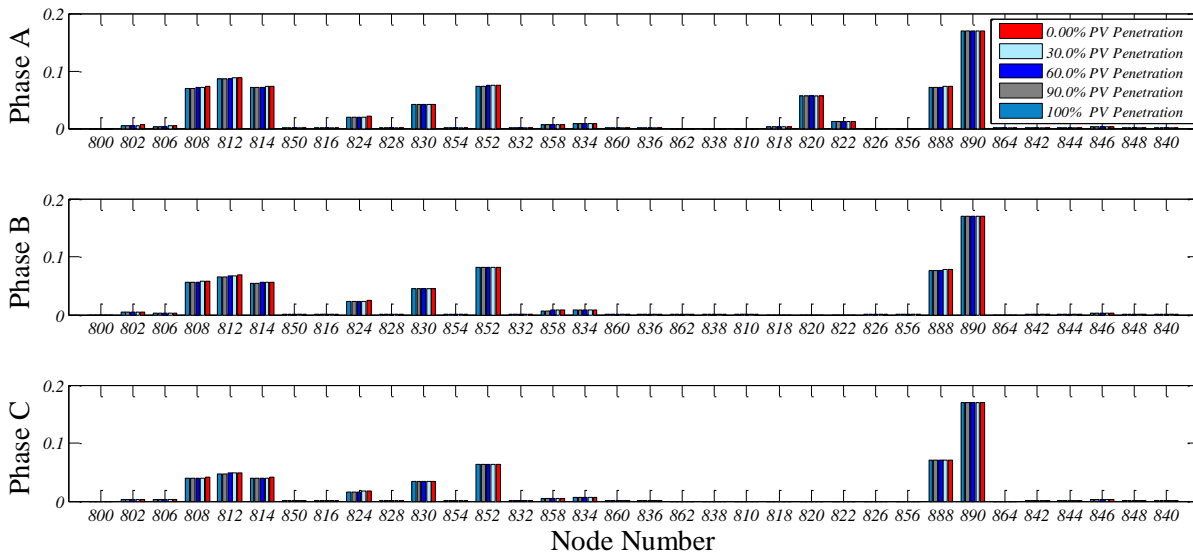


شکل (۴-۱۳): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۲۰-۸۲۲

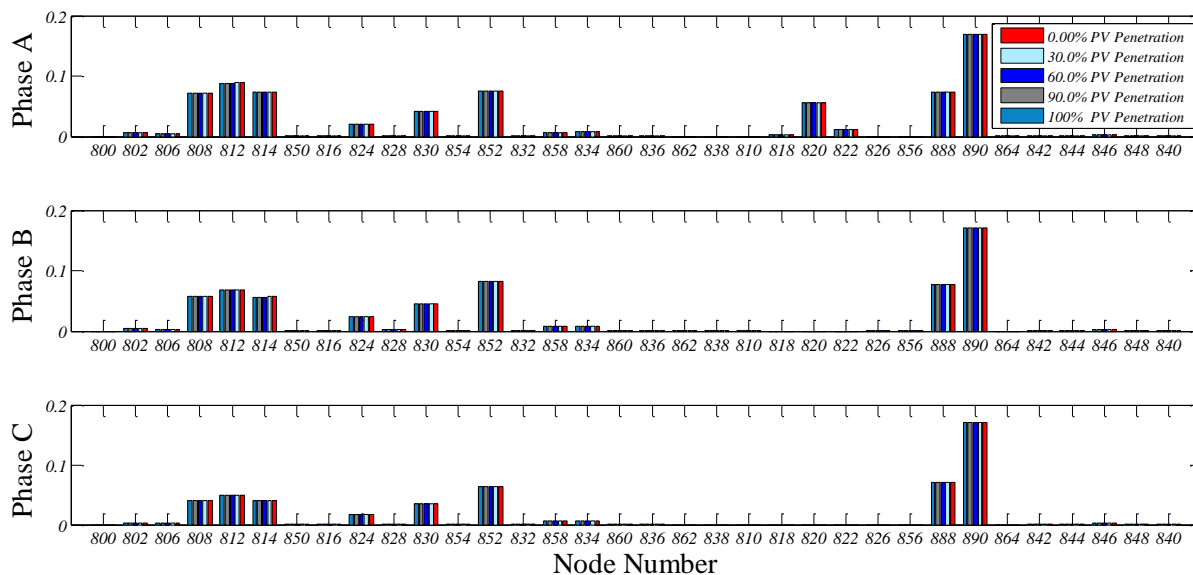


شکل (۴-۱۴): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۳۰

فصل چهارم: تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE با حضور PV



شکل (۴-۱۵): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۲۴



شکل (۴-۱۶): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۰۸

همان طور که شکل های (۴-۱۲) تا (۴-۱۶) نشان می دهند، اثر نصب PV در مقدارهای مختلف و

متناسب با بار متصل به گره های مورد بررسی (گره ۸۹۰، ۸۲۰-۸۲۲، ۸۳۰، ۸۲۴ و ۸۰۸) بر پایداری ولتاژ

کل سیستم ۳۴ گره نشان داده شد. شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) مربوط به گره‌های ۸۲۴ و ۸۰۸، برای مطالعه بیشتر اثر PV بر میزان پایداری مورد بررسی قرار گرفتند، چراکه در این گره‌ها باری متصل نبود و ما سطح نفوذ PV را برای این دو گره از مقدار مجموع بارهای متصل در گره‌های اطراف مشخص کردیم. اطلاعات دقیق از مقدار و نوع بارهای مجتمع و بارهای توزیع‌شده در بین خطوط شبکه ۳۴ گره IEEE در پیوست آ درج شده است. به‌طور مرسوم، مصرف‌کننده‌های شبکه توزیع، PV را در محل استفاده از توان آن برای تأمین بارهای مورد نیاز نصب می‌کنند، از این رو نصب PV در گره‌های ۸۲۴ و ۸۰۸ صرفاً جنبه مطالعاتی دارد. همچنین در این بخش به نصب PV در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری بسنده می‌کنیم، زیرا هدف ما بررسی تأثیراتی است که نصب PV بر پایداری ولتاژ سیستم می‌گذارد. از این رو بررسی گره‌های ضعیف‌تر ما را در رسیدن به هدف، بیشتر کمک خواهند کرد.

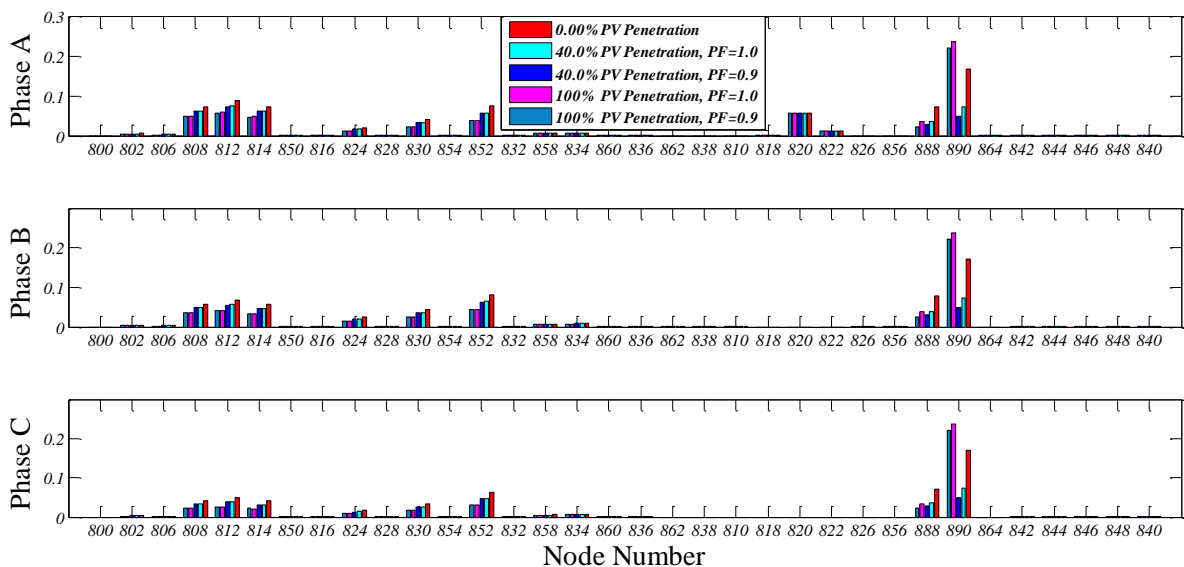
از میان تمام گره‌هایی که مطالعه شاخص پایداری برای آن‌ها انجام شد، طبق شکل (۴-۱۲) گره ۸۹۰ بیشترین حساسیت را در پایداری ولتاژ با نفوذهای مختلف PV نشان می‌دهد. در این رابطه تقریباً تا نفوذ ۴۰٪ PV (۱۸۰kw) در برابر ۴۵۰kw بار گره ۸۹۰) در گره ۸۹۰، مقدار شاخص پایداری حکایت از بهبود وضعیت دارد و در نفوذهای بالاتر، شاخص اثر نامطلوب ادغام PV بر پایداری ولتاژ سیستم را نشان می‌دهد. شکل (۴-۱۲) نشان داد که با تأمین کل توان حقیقی بار در گره ۸۹۰ توسط نصب PV (نفوذ ۱۰۰٪) مقدار شاخص بدترین وضعیت را برای پایداری ولتاژ نشان داد. در این حالت مقدار شاخص پایداری ولتاژ L_k به ۰/۲۵ رسیده است و در برابر سایر نفوذهای فرورپاشی ولتاژ (مقدار یک) نزدیک‌تر است. توجه این موضوع در عدم توانایی خط برای تأمین مقدار توان موهومی بار است زیرا سطح تأمین توان موهومی به مقدار توان حقیقی مورد تقاضا بستگی دارد و ولتاژ ارتباط نزدیکی با تأمین توان موهومی بار دارد.

۲-۴-۴ محاسبه شاخص پایداری ولتاژ با لحاظ توان موهومی PV

شاخص پایداری ولتاژ L_k طبق رابطه (۳-۱۴)، ادغام PV به شبکه را در ضریب توان واحد در نظر می‌گیرد. همان‌طور که گفته شد، بهره‌برداری از PV برای تولید توان موهومی و کنترل ولتاژ شبکه توزیع طبق استانداردهای وضع شده ممنوع است و از این منابع در ضریب توان‌های بیشتر از ۰/۸۵ باید از PV بهره‌برداری شود. حال اگر در رابطه شاخص پایداری ولتاژ L_k ، توان موهومی PV در نظر گرفته شود شاخص پایداری طبق رابطه (۴-۱) قابل توسعه است. در رابطه (۴-۱) توان موهومی منبع تولید پراکنده بر اساس ضریب توان بهره‌برداری از منبع، طبق (۴-۲) قابل محاسبه است. در این بخش، اثر نفوذهای مختلف PV در ضریب توان ۰/۹ در گره ۸۹۰ بر پایداری ولتاژ شبکه بررسی می‌شود.

$$L_k = \frac{2\sqrt{\left\{ \left(R_s^2 + X_s^2 \right) \left[\left(P_r - P_{DG} \right)^2 + \left(Q_r - Q_{DG} \right)^2 \right] \right\}}}{\left| V_s \right|^2 - 2 \left\{ R_s \left(P_r - P_{DG} \right) + X_s \left(Q_r - Q_{DG} \right) \right\}} \leq 1 \quad (1-4)$$

$$Q_{DG} = P_{DG} \tan \varphi_{DG} \quad (2-4)$$

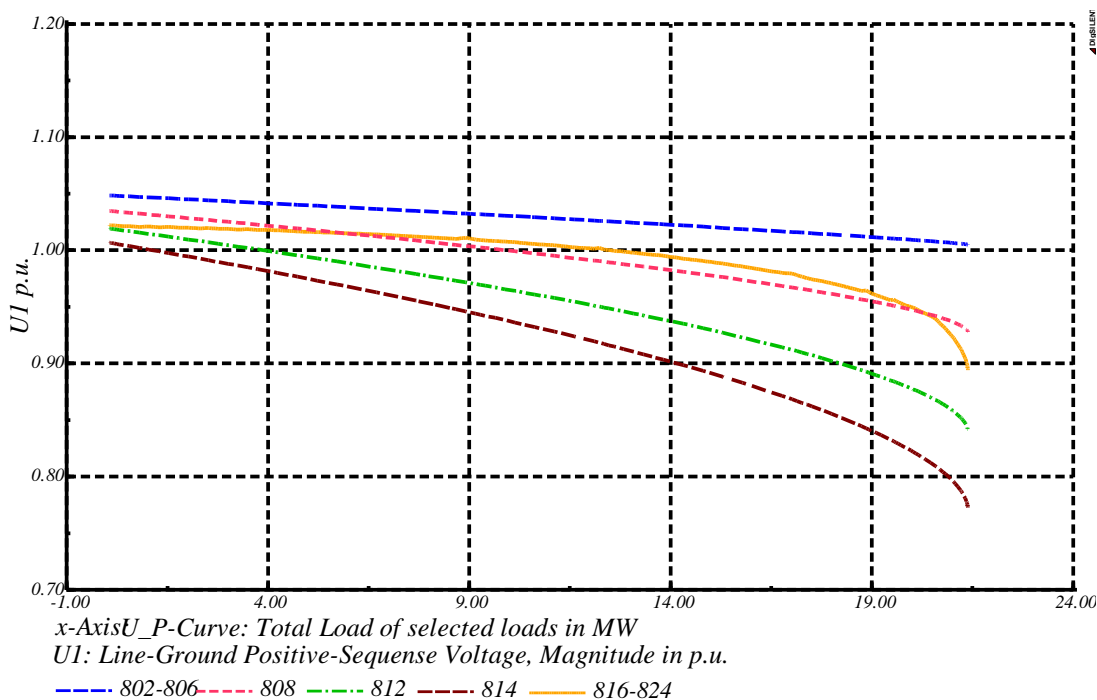


شکل (۴-۱۷): مقدار شاخص پایداری L_k در سیستم ۳۴ گره IEEE با ضریب توان‌های مختلف PV در گره ۸۹۰

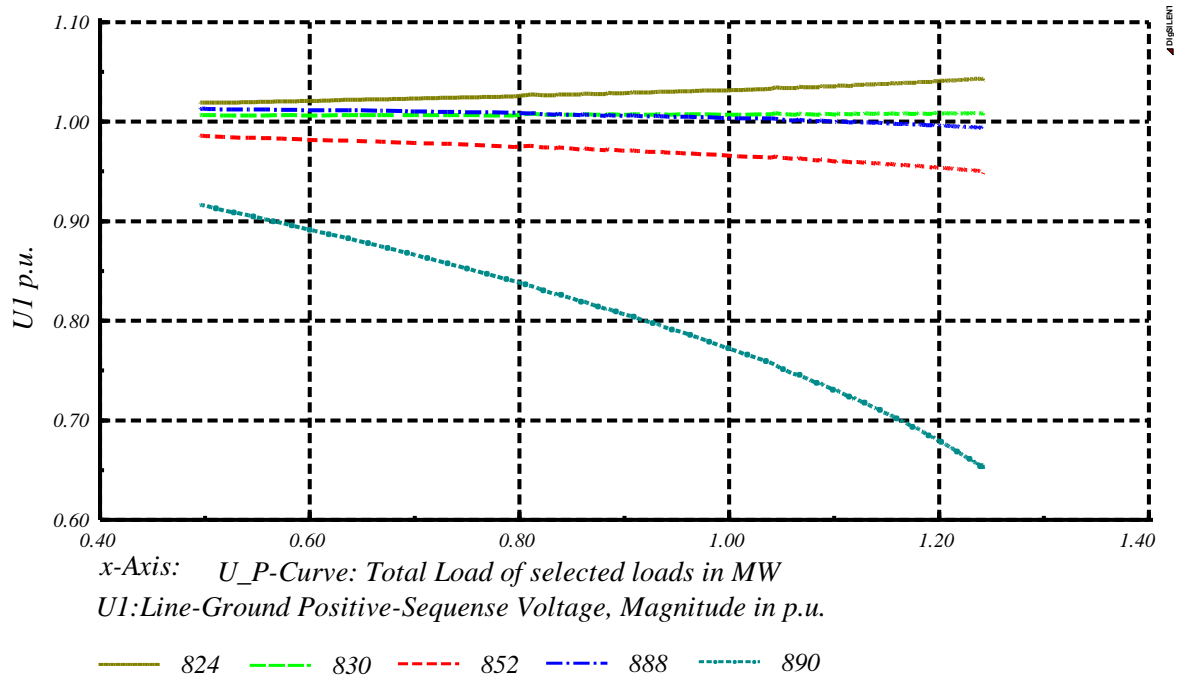
همان طور که شکل (۱۷-۴) نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن توان موهومی تزریق شده توسط PV به شبکه، پایداری ولتاژ بهبود می‌یابد. این وضعیت در نفوذ ۴۰٪ و ۱۰۰٪ PV در گره ۸۹۰ با دو ضریب توان متفاوت در ادغام PV طبق شکل (۱۷-۴) نشان داده شده است.

۳-۴-۴ استفاده از منحنی‌های V-P

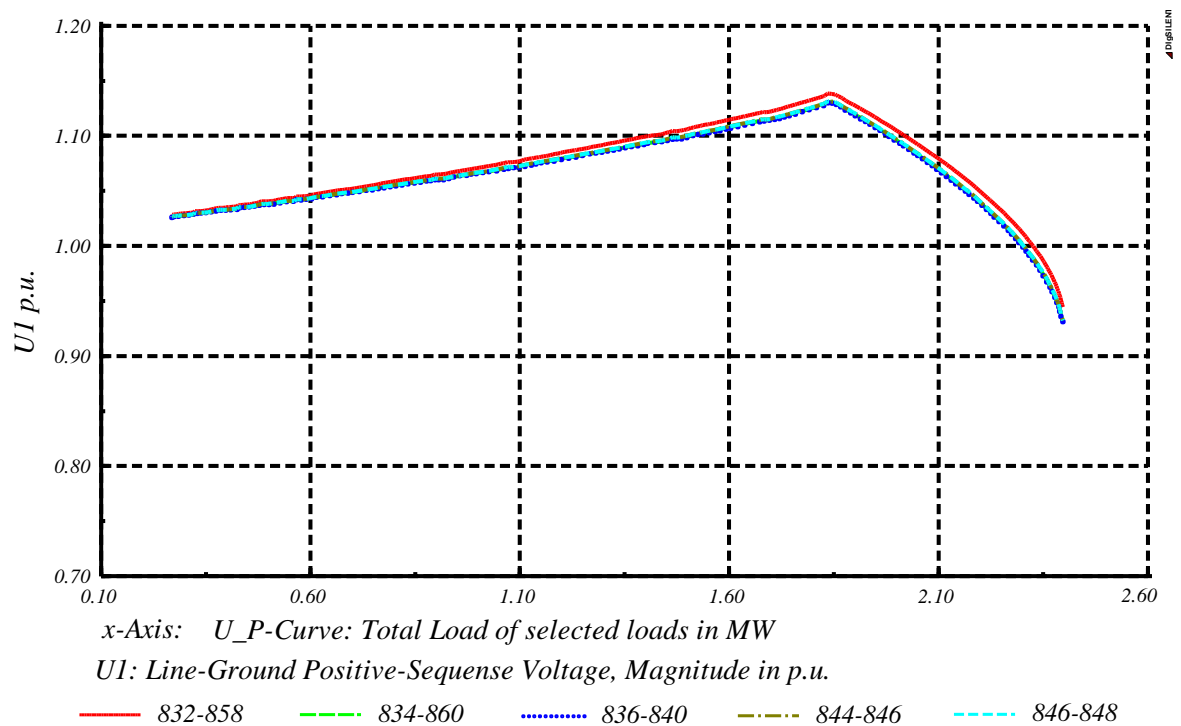
همان طور که در فصل دوم اشاره شد، با استفاده از منحنی‌های V-P می‌توان تأثیر بارگذاری بر ولتاژ را در شبکه نشان داد. در بخش قبل، تحلیل پایداری ولتاژ سیستم ۳۴ گره در نفوذهای مختلف PV با استفاده از شاخص انجام شد. در این بخش با استفاده از نرم‌افزار دیگسایلنت منحنی‌های V-P برای سیستم ۳۴ گره طبق شکل‌های (۱۸-۴) تا (۲۱-۴) نشان داده است. سعی ما بر آن است که با استفاده از نتایجی که از منحنی‌های V-P به دست می‌آیند، صحت نتایج حاصل از شاخص پایداری ولتاژ مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرند.



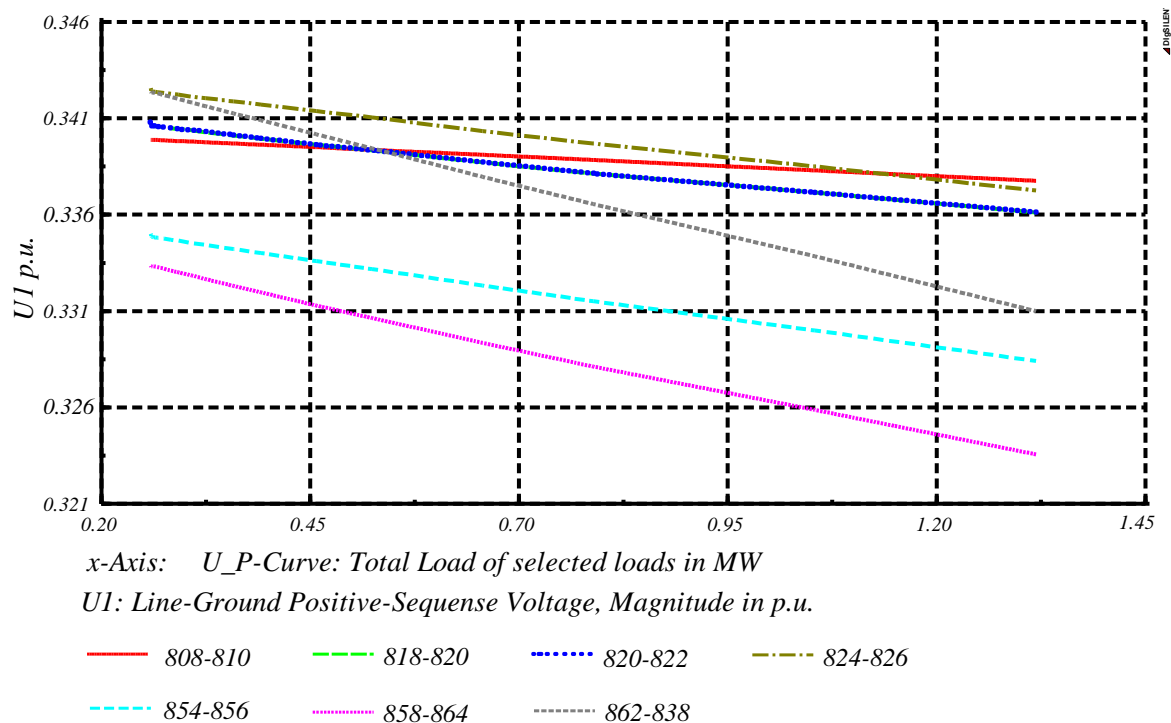
شکل (۱۸-۴): منحنی‌های V-P در گره‌های نزدیک به گره مرجع سیستم ۳۴ گره IEEE



شکل (۴-۱۹): منحنی‌های V-P در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری طبق شاخص پایداری ولتاژ



شکل (۴-۲۰): منحنی‌های V-P در گره‌های انتهایی سیستم ۳۴ گره IEEE



شکل (۴-۲۱): منحنی‌های V-P در گره‌های تک فاز سیستم ۳۴ گره IEEE

در رسم منحنی‌های V-P، مؤلفه مثبت ولتاژ به ازای تغییرات توان محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهند که ضعیف‌ترین مشخصه V-P طبق شکل (۴-۱۹) مربوط به گره ۸۹۰ است. شکل (۴-۲۱) منحنی‌های V-P را برای گره‌های تک فاز سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE نشان می‌دهد. از این رو مؤلفه مثبت، منفی و صفر ولتاژ با یکدیگر برابر و یک‌سوم مقدار ولتاژ خطوط تک فاز در سیستم هستند. از منحنی‌های V-P رسم شده می‌توان نتایجی به صورت زیر گرفت:

۱. در تمام منحنی‌ها در اثر بارگذاری، ولتاژ کاهش می‌یابد. در شکل (۴-۲۰) به دلیل آنکه دو خازن در گره‌های انتهایی شبکه با مقادیر قابل توجه نسبت به اندازه بارها وجود دارد، ابتدا ولتاژ افزایش و سپس در نهایت کاهش می‌یابد. این موضوع طبق منحنی‌های نرمالیزه v-p شکل (۲-۲) برای بارها یا شبکه‌ها با ویژگی‌های خازنی، قابل توجیه است.

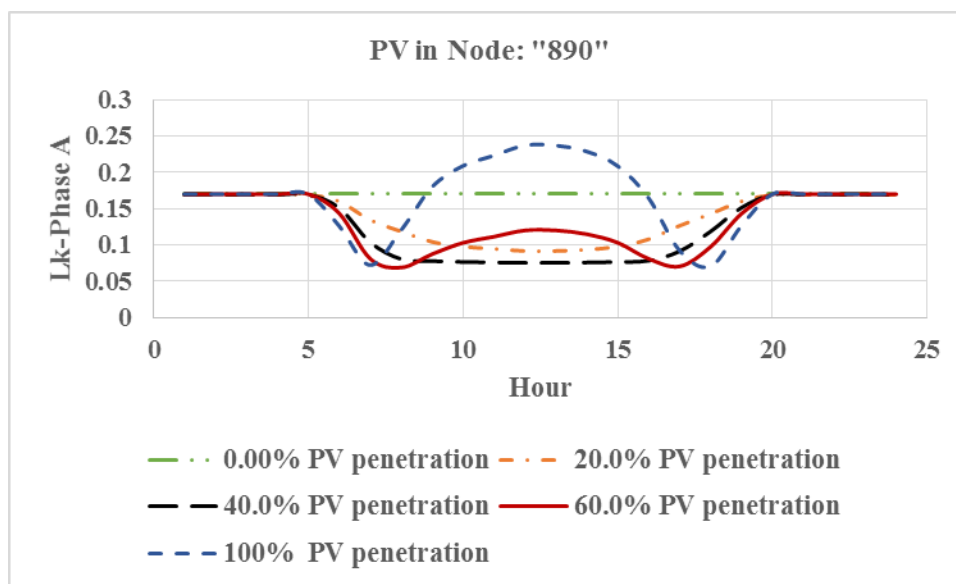
۲. در گره ۸۹۰ اثر بارگذاری تا ۱/۲۵ مگاوات ولتاژ به نقطه بحرانی خواهد رسید و ضعیف‌ترین منحنی مشخصه V-P مربوط به این گره است. این در حالی است که سایر گره‌هایی که توسط شاخص پایداری ولتاژ به‌عنوان گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری معرفی شده بودند، تا این سطح بارگذاری، ولتاژ خود را در مقدار مناسب حفظ کرده‌اند. بنابراین واکنش گره ۸۹۰ به بارگذاری یا نصب PV در این گره نسبت به سایر گره‌ها طبق نتایج شاخص پایداری ولتاژ شکل (۴-۱۲) و منحنی‌های V-P شکل (۴-۱۹) قابل توجه است.

۳. طبق شکل (۴-۱۸) نسبت به منحنی‌های V-P سایر گره‌ها، خطوط در ابتدای شبکه قابلیت بارگذاری بیشتری دارند که این با توجه به امپدانس خط و کیفیت نوع خطوط در این گره‌ها امری بدیهی است (برای اطلاعات بیشتر در مورد جنس و نوع ساختار خطوط به پیوست آ مراجعه شود).

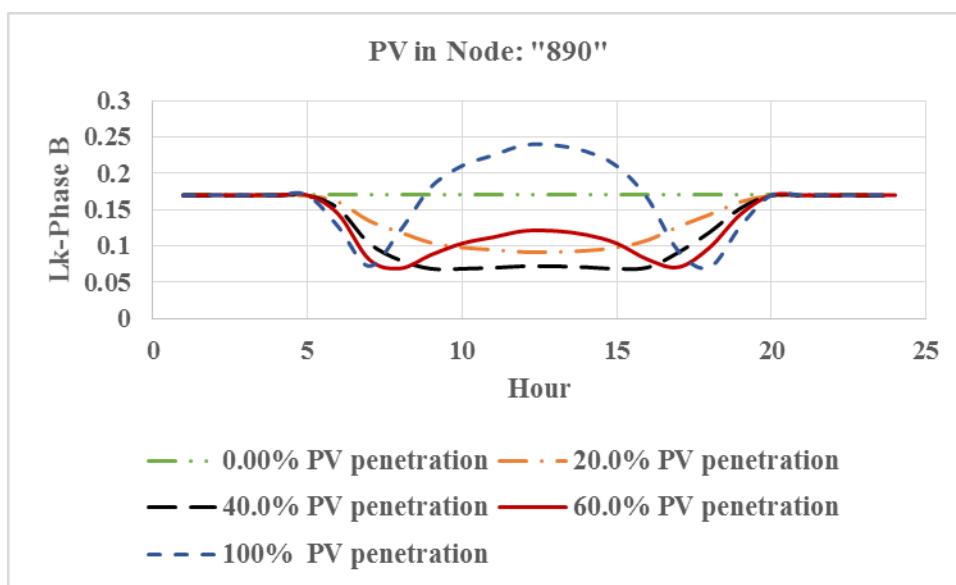
۴-۴-۴ تأثیر افت توان PV طی یک شبانه‌روز بر پایداری ولتاژ گره ۸۹۰

همان‌طور که در فصل سوم این پایان‌نامه تشریح گردید، تولید توان توسط PV، فقط در ساعات محدودی در طی یک شبانه‌روز به مقدار ظرفیت نامی خود می‌رسد. هدف ما در این بخش پیوند زدن تأثیر PV بر پایداری ولتاژ در ساعات مختلف روز است. طبق مدل پیشنهادی PV در این پایان‌نامه مطابق با شکل (۳-۲۸)، تأثیر تغییر توان PV در طی شبانه‌روز و با ضریب نفوذهای مختلف (از مقدار نفوذ کم تا نفوذهای بالا) در بحرانی‌ترین گره سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE بررسی می‌شود. با توجه به مقدار بار متصل شده به گره ۸۹۰، توان PV در نفوذهای مختلف جهت ادغام به شبکه در محل این گره مشخص می‌شود (اطلاعات دقیق بار در پیوست آ ملاحظه شود). در این بخش طبق شکل‌های (۴-۲۲) تا (۴-۲۴)، با توجه به ویژگی‌هایی که در رابطه با PV بیان شد، شاخص پایداری ولتاژ L_k در هر فاز گره ۸۹۰ در طی

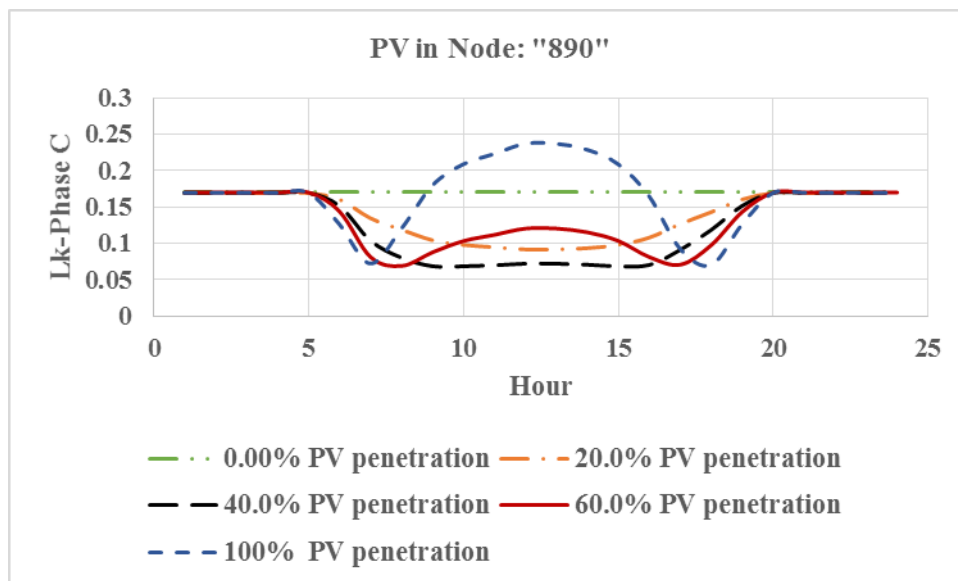
۲۴ ساعت محاسبه می‌شود. شکل (۲۲-۴)، شاخص پایداری ولتاژ را در نفوذهای مختلف و در نظر گرفتن مدل روزانه شکل (۲۸-۳) برای PV، در فاز A گره ۸۹۰ نشان می‌دهد. به همین ترتیب شکل‌های (۲۳-۴) و (۲۴-۴) مربوط به فازهای B و C در این گره هستند.



شکل (۲۲-۴): مقدار شاخص پایداری L_k مربوط به فاز A گره ۸۹۰ در نفوذهای مختلف PV



شکل (۲۳-۴): مقدار شاخص پایداری L_k مربوط به فاز B گره ۸۹۰ در نفوذهای مختلف PV



شکل (۴-۲۴): مقدار شاخص پایداری L_k مربوط به فاز C گره ۸۹۰ در نفوذهای مختلف PV

اگرچه بار گره ۸۹۰ به صورت متعادل است اما با توجه به نامتعادل بودن کل شبکه، نتایج مربوط به هر فاز، به طور کاملاً مشابه با یکدیگر نیستند و به همین دلیل نتایج محاسبه شاخص پایداری برای گره ۸۹۰ در فازهای مختلف به طور جداگانه رسم شده است. طبق شکل (۴-۲۲) در ساعاتی از ظهر که توان تولیدی PV به مقدار نامی خود می‌رسد، نتایج محاسبه شاخص پایداری ولتاژ با شکل (۴-۱۲) مطابقت می‌کند. شکل (۴-۱۲)، اثر نفوذ PV را به صورت تولید توان در مقدار نامی در نظر گرفته بود. اکنون با ایجاد قدرت تحلیل بیشتر و پیوند تحلیل پایداری ولتاژ با مدل تولید روزانه PV، تأثیر نفوذهای مختلف PV بر پایداری با استفاده از شکل‌های (۴-۲۲) تا (۴-۲۴) در هر ساعتی از شبانه‌روز میسر شده است.

طبق شکل (۴-۲۲)، تأثیر منفی نفوذهای بالای PV بر پایداری ولتاژ فقط محدود به ساعات خاصی است. به عنوان مثال در ۱۰۰٪ نفوذ PV در گره ۸۹۰، تأثیر منفی این ادغام فقط مرتبط به محدوده زمانی ۹ صبح تا ۴ بعدازظهر است. با توجه به همین شکل نیز بهترین وضعیت پایداری ولتاژ برای گره ۸۹۰ در ۴۰٪ نفوذ PV و در ساعاتی که تولید به حد نامی می‌رسد رقم می‌خورد. بازه‌های زمانی

کوچکی نیز وجود دارد که سایر نفوذهای PV در آن شرایط بهترین وضعیت را از نقطه نظر پایداری ولتاژ رقم می‌زنند، در ساعت ۸ صبح، نفوذ ۶۰٪ PV بهترین وضعیت پایداری را به وجود می‌آورد ولی با توجه به کوتاهی این بازه، این ویژگی چندان مورد نظر نمی‌تواند باشد.

۴-۵ تلفات

در خطوط توزیع، بیشترین سهم تلفات الکتریکی مربوط به تلفات اهمی خط است. هرچند در طراحی سیستم قدرت با افزایش سطح ولتاژ در خطوط انتقال، میزان تلف توان اهمی خط تا مقدار قابل توجهی کاهش یافته ولی پیاده‌سازی این نگرش در خطوط توزیع با محدودیت‌های فراوانی همراه است. به‌طور کلی در سیستم‌های قدرت بالاترین سهم تلفات به سیستم توزیع اختصاص دارد. از عمده دلایل این موضوع می‌توان به وجود بارهای تک فاز با سطح ولتاژ پایین اشاره نمود. طبق رابطه (۴-۳)، در سیستم توزیع متعادل جریان جاری شده در سیم نول صفر است؛ ولی در صورت نامتعادلی سیستم از سیم نول جریانی برابر با رابطه (۴-۴) جاری شده که سهم عمده‌ای از تلفات سیستم را شامل می‌شود.

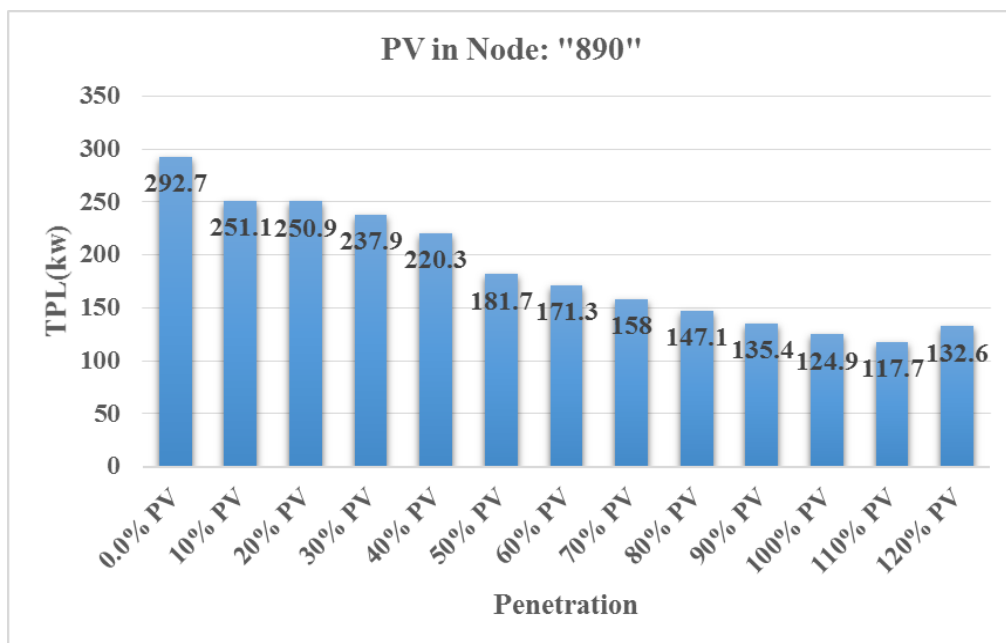
$$I_a + I_b + I_c = I_n = 0 \quad (3-4)$$

$$I_n = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 - I_a I_b - I_a I_c - I_b I_c} \quad (4-4)$$

۴-۵-۱ تلفات سیستم ۳۴ گره با نصب PV در گره ۸۹۰

با استفاده از نرم‌افزار دیگسایلنت و قابلیت انجام پخش بار شبکه‌های توزیع نامتعادل در آن، می‌توان مقدار تلفات را به‌صورت دقیق و با در نظر گرفتن نامتعادلی بار سیستم محاسبه کرد. همان‌طور که شکل (۴-۲۵) نشان می‌دهد، با نصب PV در گره ۸۹۰ تلفات کل شبکه کاهش می‌یابد. جهت مطالعه

بیشتر تلفات در این بخش، کل تلفات توان (TPL)^۱ سیستم با نصب PV در گره ۸۹۰ با توان بیشتر از درخواست بار نیز مورد بررسی قرار گرفته است که البته این عمل بیشتر جنبه مطالعاتی دارد و در عمل به طور رایج، مصرف کنندگان شبکه بیش از نیاز خود اقدام به نصب منابع تولید پراکنده‌ای چون PV به دلیل صرفه اقتصادی نمی‌کنند. طبق شکل (۴-۲۵) با نصب PV تا سطح مشخص، تلفات حداقل می‌شود و از این مقدار به بعد با ادغام توان بیشتری از PV تلفات افزایش یافته است.



شکل (۴-۲۵): تلفات سیستم ۳۴ گره با نفوذهای مختلف PV در گره ۸۹۰

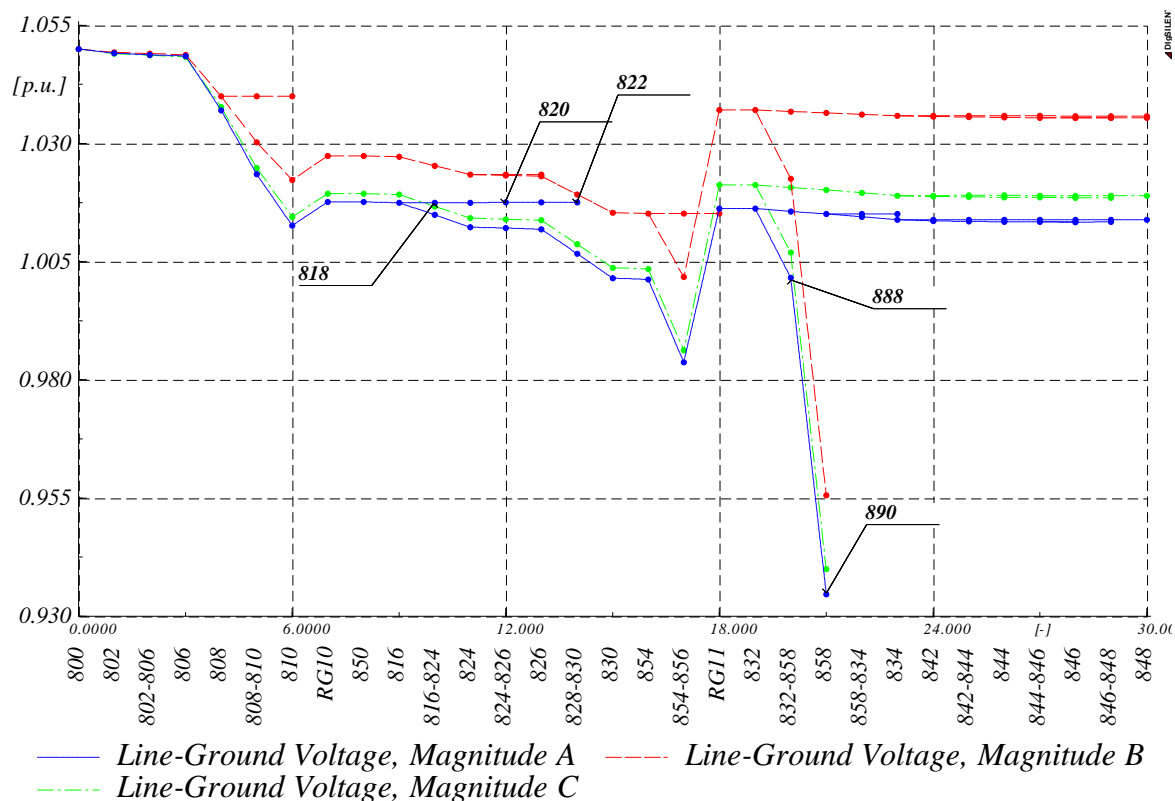
با توجه به اینکه گره ۸۹۰ به‌عنوان ضعیف‌ترین گره به ناپایداری ولتاژ در سیستم ۳۴ گره محسوب می‌شود، پس مناسب‌ترین مکان جهت بهبود پایداری با استفاده از نصب PV نیز است. طبق محاسبه شاخص پایداری ولتاژ در نفوذهای مختلف PV در گره ۸۹۰ مطابق با شکل (۴-۱۲)، اگر بهبود قید پایداری ولتاژ مهم‌تر از تلفات در نظر گرفته شود، با نفوذ PV تا ۴۰٪ شاخص پایداری ولتاژ حداقل شده و بهترین وضعیت پایداری ولتاژ در این گره ایجاد می‌شود. کل تلفات توان نیز در سیستم به

¹ Total Power Losses

فصل چهارم: تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE با حضور PV

۳kw/۲۲۰٪ کاهش می‌یابد. با نصب این مقدار PV در گره ۸۹۰، پروفایل ولتاژ نیز طبق شکل (۴-۲۶) در گره ۸۹۰ به بیشتر از ۰/۹۳pu بهبود یافته است.

در این رابطه، اگر قید تلفات مهم‌تر از قید پایداری ولتاژ در نظر گرفته شود، با نصب PV تا نفوذ ۱۰٪، کل تلفات سیستم به ۱۲۴/۹kw کاهش می‌یابد ولی سیستم به آستانه ناپایداری ولتاژ (مقدار شاخص برابر با یک) نزدیک‌تر می‌شود. در این بخش سعی شد تا به بیان مفهومی دقیق از موضوع پایداری ولتاژ و تلفات یک سیستم توزیع با حضور PV برسیم.



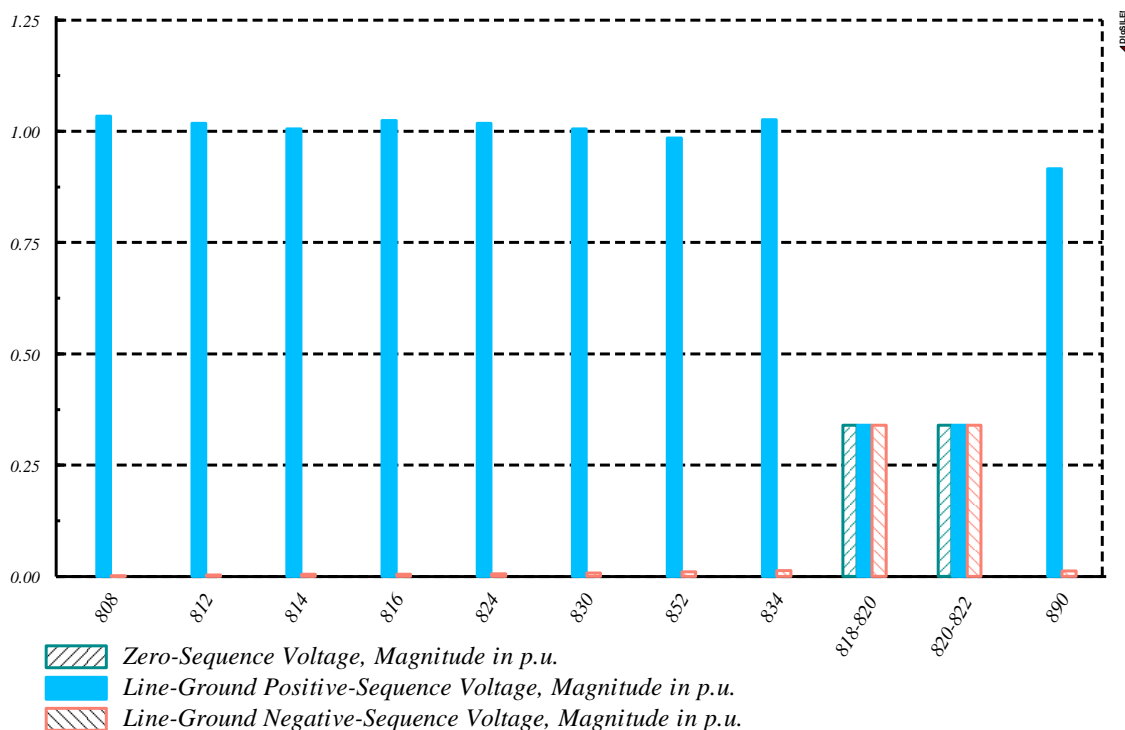
شکل (۴-۲۶): پروفایل ولتاژ سیستم ۳۴ گره IEEE با نصب ۴۰٪ PV در گره ۸۹۰

اگر از PV صرفاً به منظور بهبود در پایداری یا کاهش تلفات سیستم استفاده شود، این موضوع نباید بر ولتاژ مجاز بهره‌برداری از شبکه تأثیر منفی داشته باشد. همان‌طور که در فصل سوم نیز اشاره

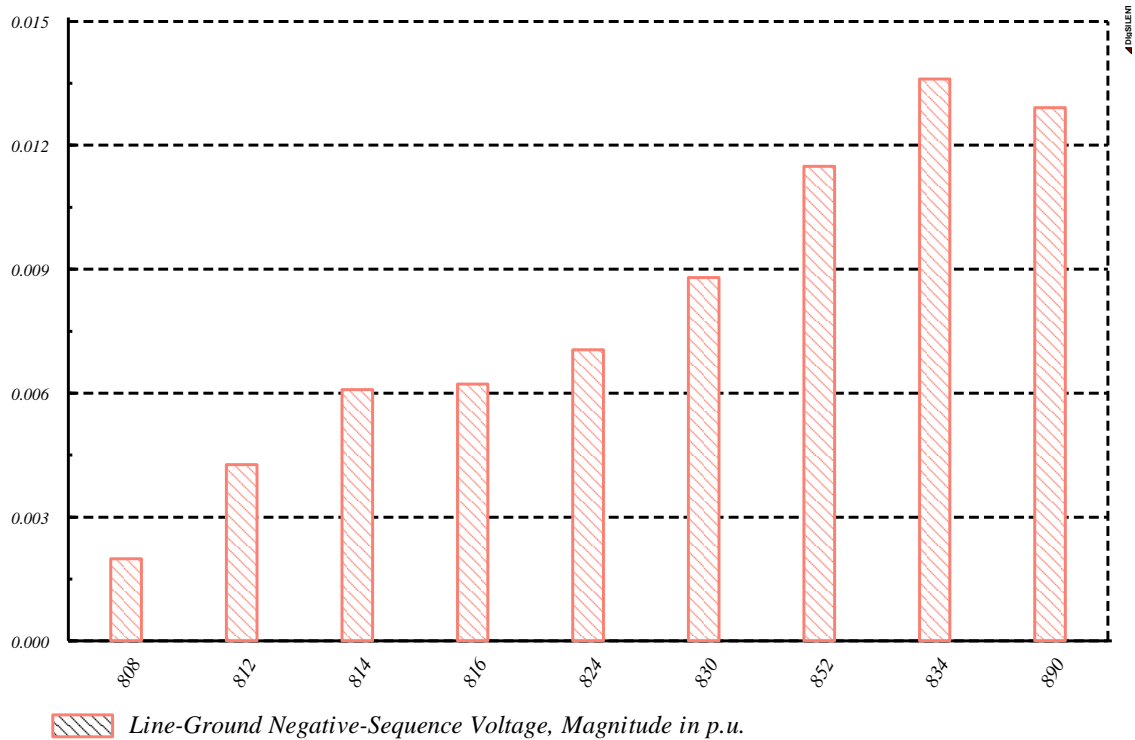
گردید، اثر ادغام PV به شبکه افزایش ولتاژ است.

۴-۶ محاسبه شاخص نامتعادلی

در این بخش ابتدا تأثیر ادغام تک فاز PV در محل بارهای سه فاز و سپس ادغام تک فاز PV در خطوط تک فاز و تأثیر آن بر نامتعادلی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. محاسبه توالی‌های ولتاژ در دیگسایلنت انجام شده است و شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸)، توالی‌های ولتاژ را در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری در سیستم ۳۴ گره IEEE نشان می‌دهند.



شکل (۴-۲۷): توالی‌های ولتاژ در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری در سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE



شکل (۴-۲۸): توالی منفی ولتاژ در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری در سیستم ۳۴ گره IEEE

جدول (۴-۱): مقدار شاخص نامتعادلی گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری در سیستم ۳۴ گره IEEE

شماره گره	V_2 (pu)	V_1 (pu)	VUF%
۸۰۸	۰/۰۰۲	۱/۰۳۵	۰/۱۹۳
۸۱۲	۰/۰۰۴	۱/۰۱۹	۰/۳۹۳
۸۱۴	۰/۰۰۶	۱/۰۰۷	۰/۵۹۶
۸۱۶	۰/۰۰۶۲	۱/۰۲۵	۰/۶۰۵
۸۲۴	۰/۰۰۷	۱/۰۱۹	۰/۶۸۷
۸۳۰	۰/۰۰۹	۱/۰۰۶	۰/۸۹۵
۸۵۲	۰/۰۱۲	۰/۹۸۶	۱/۲۱۷
۸۳۴	۰/۰۱۴	۱/۰۲۷	۱/۳۶۳
۸۹۰	۰/۰۱۳	۰/۹۱۷	۱/۴۱۸

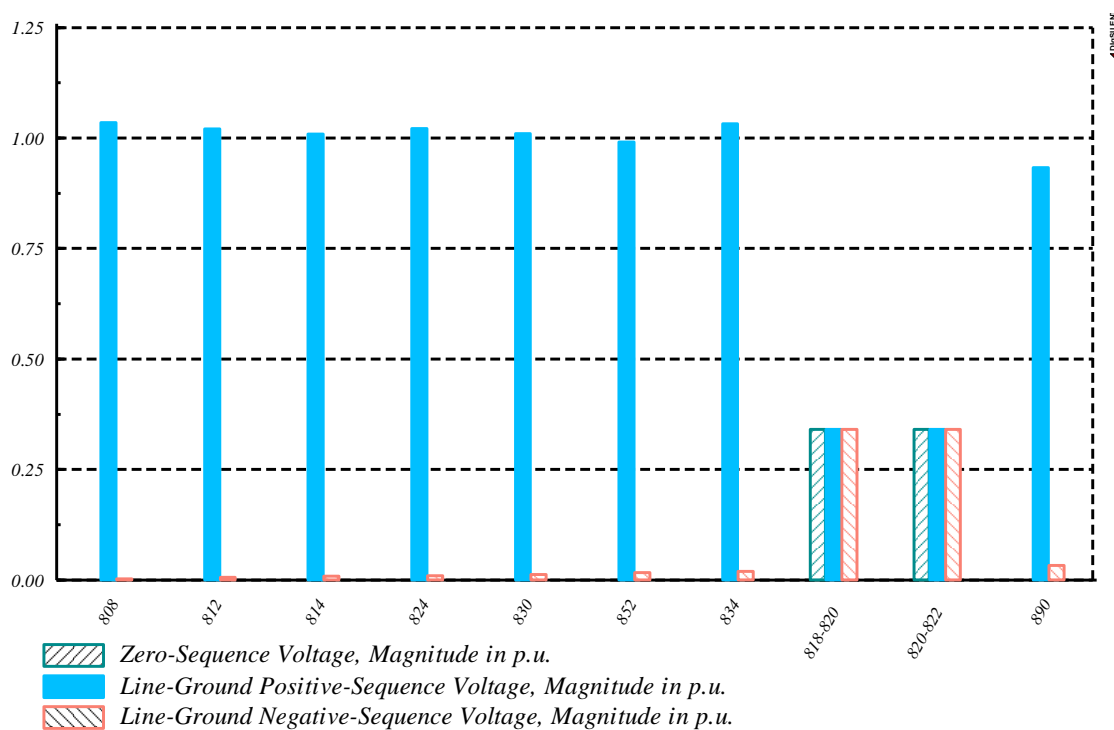
همان‌طور که شکل (۴-۲۷) نشان می‌دهد، مقدار توالی مثبت، منفی و صفر ولتاژ در گره‌های تک

فاز با یکدیگر برابر هستند و در گره‌های سه فاز نیز با توجه به بهره‌برداری از شبکه، مقدار توالی‌های منفی

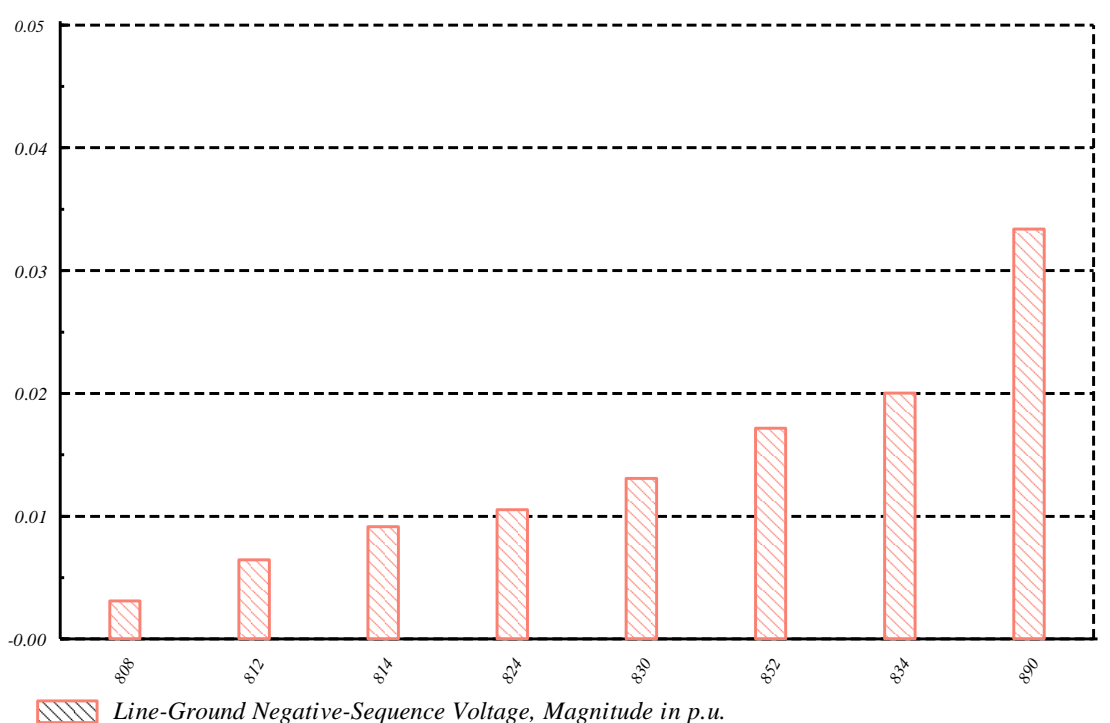
فصل چهارم: تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE با حضور PV

و صفر ولتاژ در برابر توالی مثبت، بسیار ناچیز هستند. در جدول (۴-۱) مقدار نامتعادلی این گره‌ها طبق شاخص VUF محاسبه شده است. طبق جدول (۴-۱)، بیشترین مقدار نامتعادلی در گره‌های سه فاز شبکه ۳۴ گره IEEE مربوط به گره ۸۹۰ است.

در گره ۸۹۰، ۱۵۰kw و ۷۵kvar بار در هر فاز این گره نصب شده است. به‌طور مثال، اگر در یکی از فازهای این گره PV تا مقدار ۴۰٪ نصب شود (مثلاً ۶۰kw PV در فاز A گره ۸۹۰)، شاخص پایداری ولتاژ مربوط به آن از ۰/۱۸ به کمتر از ۰/۷ بهبود می‌یابد ولی طبق نتایج شکل‌های (۴-۲۹) و (۴-۳۰) با محاسبه VUF% با این مقدار ادغام PV در سیستم، در این حالت مقدار نامتعادلی ولتاژ از ۱/۴۱۸٪ به ۳/۵۷۶٪ افزایش می‌یابد.



شکل (۴-۲۹): توالی‌های ولتاژ در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری با ۴۰٪ نفوذ تک فاز PV در فاز A گره ۸۹۰



شکل (۴-۳۰): توالی منفی ولتاژ در گره‌های ضعیف‌تر به ناپایداری با ۴۰٪ نفوذ تک فاز PV در فاز A گره ۸۹۰

بنابراین، نفوذ PV به صورت تک فاز در شبکه‌های سه فاز که به صورت متعادل بارگذاری شده‌اند، می‌تواند به عنوان یکی از عوامل منفی تأثیرگذار بر ایجاد نامتعادلی در شبکه باشد. به طور مشابه نیز می‌توان این طور استدلال نمود که اگر از PV در خط تک فاز انشعاب شده از شبکه استفاده گردد، تا حدی می‌توان بر جبران نامتعادلی و افزایش سطح بهره‌وری از کل شبکه تأثیر گذاشت.

۷-۴ جمع بندی

در این فصل، پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع ۳۴ گره IEEE در نفوذهای مختلف PV مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که ادغام PV در سطح سیستم توزیع فشار ضعیف، بر حاشیه پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع برق تأثیرگذار است. در این پایان‌نامه، اثر ادغام PV بر پایداری ولتاژ در سطوح ولتاژ ۲۴/۹ و ۴/۱۶ کیلوولت نشان داده شد. حال آنکه راهکار پیشنهاد شده می‌تواند برای هر

سطح ولتاژی از سیستم‌های توزیع به کار گرفته شود و این روش، پاسخگو خواهد بود.

نتایج نشان دادند که بر اساس مقدار بار و مشخصات امپدانس خطوط توزیع، تأثیر نصب PV بر پایداری ولتاژ می‌تواند مثبت و یا منفی باشد. محل بارها در انتهای خطوط توزیع جبران نشده با توجه به طول و موقعیت فیدر (مانند گره ۸۹۰)، نقاط مهمی از نظر پایداری ولتاژ برای ادغام PV با توجه به فناوری‌های نصب این منابع هستند و وضعیت پایداری ولتاژ در این نقاط تحت تأثیر میزان نفوذ PV است.

۵ فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه برای تحقق هدف تحلیل پایداری ولتاژ و تلفات سیستم‌های توزیع با حضور منابع خورشیدی ابتدا با معرفی موضوع و شاخص‌های پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع، به بررسی چالش‌ها و موانع پیش روی نصب PV در این شبکه‌ها پرداخته شد و تأثیر PV بر پایداری ولتاژ و قابلیت بارگذاری با انجام چند شبیه‌سازی مشخص گردید. سپس تحلیل و بررسی موارد مطرح‌شده، در شبکه توزیع ۳۴ گره IEEE انجام شد و نتایج حاصل از شاخص پایداری با شبیه‌سازی و رسم منحنی‌های V-P در گره‌های شبکه مستندسازی شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که ورود PV به شبکه توزیع بر پایداری ولتاژ این شبکه‌ها تأثیرگذار است و می‌تواند وضعیت پایداری را هم بهبود بخشد یا نامساعد کند. همچنین می‌توان بهره‌برداری از PV را در ضریب توان‌های کمتر از یک انجام داد تا سطح پایداری ولتاژ بهتری در شبکه فراهم گردد؛ گرچه ضریب توان بهره‌برداری از PV دارای یک حد مجاز است که نباید کمتر از مقداری مشخص برای منابع PV باشد.

شبیه‌سازی‌ها نشان دادند در گره‌هایی از شبکه که در شرایط مختلف وضعیت متفاوتی از سطح پایداری را (بر اثر نصب و افزایش نفوذ PV) از خود نشان می‌دهند، با نصب مقدار مناسب PV می‌توان بهترین وضعیت پایداری ولتاژ را برای آن‌ها فراهم کرد. در کار ما با تحلیل پایداری ولتاژ در نفوذهای مختلف PV، نصب ۴۰٪ PV (۱۸۰kw) در محل بار واقع در انتهای فیدر ۴/۱۶ کیلوولت، بهترین وضعیت را برای پایداری ولتاژ در سیستم ۳۴ گره IEEE رقم می‌زند. حال آنکه مقدار دقیق اندازه PV در یکی از همسایگی‌های این مقدار نفوذ است و می‌توان با الگوریتم‌های بهینه‌سازی آن را مشخص کرد که البته شاید چندان کاربردی نداشته باشد زیرا مشتریان در سطح توزیع و مقیاس کوچک، عوامل دیگری هم در خرید PV، مانند قیمت PV و اینورتر مربوط به آن در سطح توان‌های مختلف را نیز در نظر می‌گیرند.

مطالعه موضوع با در نظر گرفتن سطح نفوذ (مقدار توان PV نسبت به بار در هر گره)، می‌تواند یک دید مهندسی کارآمد جهت تدوین برنامه‌های توسعه در شبکه را در اختیار شرکت‌های توزیع برق گذاشته و برای تحقق انجام برنامه‌ها با توجه به نتایج مطالعه، از راهکارهای مختلف جهت تشویق مشتریان خانگی به نصب و استفاده از PV استفاده کند. یکی دیگر از موضوعات مورد بحث، تأثیر PV بر نامتعادلی شبکه‌های متعادل بود که یکی از مشکلات پیش روی نصب PV تک فاز در شبکه است.

۲-۵ پیشنهادها

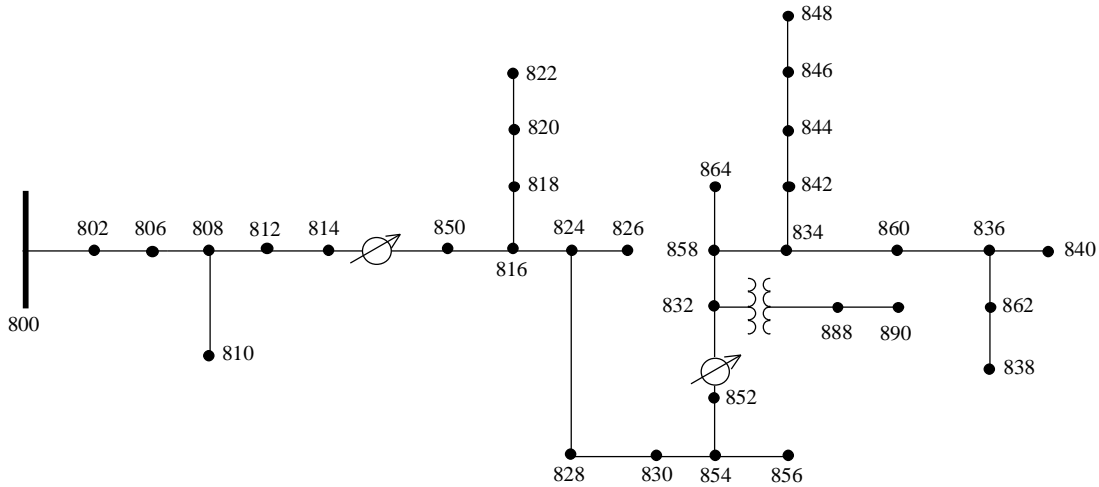
در ادامه این تلاش می‌توان به موارد دیگری از جمله موارد زیر پرداخت:

۱. بهبود پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع برق با هوشمند سازی شبکه و ورود کنترل شده و هماهنگ خودروهای الکتریکی به شبکه
۲. عملکرد PV بر پایداری شبکه توزیع برق و کنترل فرکانس در صورت ایجاد حادثه و عملکرد جزیره‌ای شبکه
۳. بررسی الگوریتم‌های مختلف جهت مکان‌یابی و مقدار بهینه نصب PV در شبکه توزیع برق
۴. ارائه شاخص‌های جدید پایداری ولتاژ جهت استفاده در برنامه‌های تخمین حالت^۱، شاخص‌هایی که فقط احتیاج به اندازه‌گیری یکی از سه پارامتر توان، ولتاژ یا زاویه در شبکه را داشته باشند و وضعیت پایداری ولتاژ را مشخص کنند.
۵. بررسی تأثیر PV بر پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع بر اساس شاخصی که فاصله الکتریکی این منابع را نیز نسبت به یکدیگر در نظر بگیرد.

¹ State Estimation

۶. طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها، نامتعادلی شبکه از دیگر عواملی است که بر اثر نصب تک فاز PV در شبکه‌های توزیع متعادل ایجاد می‌گردد و این موضوع به‌عنوان یک چالش اساسی دیگر برای نصب PV در شبکه است. از این رو ارائه یک راهکار که نامتعادلی، پایداری ولتاژ و تلفات سیستم توزیع را توأم با یکدیگر و با در نظر گرفتن ضریب ارزش برای هر یک بهینه کند پیشنهاد می‌گردد.

اطلاعات سیستم ۳۴ گره IEEE.



IEEE 34 Node Test Feeder

Overhead Line Configuration Data:

Config.	Phasing	Phase	Neutral	Spacing
		ACSR	ACSR	ID
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

Line Segment Data:

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
800	802	2580	301
802	806	1730	301
806	808	32230	301
808	810	5804	303
808	812	37500	301
812	814	29730	301
814	850	10	301
816	818	1710	302
816	824	10210	301
818	820	48150	302
820	822	13740	302
824	826	3030	303

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
824	828	840	301
828	830	20440	301
830	854	520	301
832	858	4900	301
832	888	0	XFM-1
834	860	2020	301
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1350	301
844	846	3640	301
846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23330	303
854	852	36830	301
858	864	1620	303
858	834	5830	301
860	836	2680	301
862	838	4860	304
888	890	10560	300

Transformer Data:

	kVA	kV-high	kV-low	R - %	X - %
Substation:	2500	69 - D	24.9 -Gr. W	1	8
XFM -1	150	24.9 -Gr. W	4.16 - Gr. W	1.9	4.08

Substation Voltage = 1.05 pu Balanced

Shunt Capacitor Data:

Node	Ph-A	Ph-B	Ph-C
	kVAr	kVAr	kVAr
844	100	100	100
848	150	150	150
Total	250	250	250

Regulator Data:

Regulator ID:	1		
Line Segment:	814 - 850		
Location:	814		
Phases:	A - B -C		
Connection:	3-Ph,LG		
Monitoring Phase:	A-B-C		
Bandwidth:	2.0 volts		
PT Ratio:	120		
Primary CT Rating:	100		

Compensator Settings:	Ph-A	Ph-B	Ph-C
R - Setting:	2.7	2.7	2.7
X - Setting:	1.6	1.6	1.6
Voltage Level:	122	122	122

Regulator ID:	2		
Line Segment:	852 - 832		
Location:	852		
Phases:	A - B - C		
Connection:	3-Ph, LG		
Monitoring Phase:	A-B-C		
Bandwidth:	2.0 volts		
PT Ratio:	120		
Primary CT Rating:	100		
Compensator Settings:	Ph-A	Ph-B	Ph-C
R - Setting:	2.5	2.5	2.5
X - Setting:	1.5	1.5	1.5
Voltage Level:	124	124	124

Spot Load Data:

Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
860	Y-PQ	20	16	20	16	20	16
840	Y-I	9	7	9	7	9	7
844	Y-Z	135	105	135	105	135	105
848	D-PQ	20	16	20	16	20	16
890	D-I	150	75	150	75	150	75
830	D-Z	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

Distributed Load Data:

Node	Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-3
A	B	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
802	806	Y-PQ	0	0	30	15	25	14
808	810	Y-I	0	0	16	8	0	0
818	820	Y-Z	34	17	0	0	0	0
820	822	Y-PQ	135	70	0	0	0	0
816	824	D-I	0	0	5	2	0	0
824	826	Y-I	0	0	40	20	0	0
824	828	Y-PQ	0	0	0	0	4	2
828	830	Y-PQ	7	3	0	0	0	0
854	856	Y-PQ	0	0	4	2	0	0
832	858	D-Z	7	3	2	1	6	3
858	864	Y-PQ	2	1	0	0	0	0
858	834	D-PQ	4	2	15	8	13	7
834	860	D-Z	16	8	20	10	110	55
860	836	D-PQ	30	15	10	6	42	22

836	840	D-I	18	9	22	11	0	0
862	838	Y-PQ	0	0	28	14	0	0
842	844	Y-PQ	9	5	0	0	0	0
844	846	Y-PQ	0	0	25	12	20	11
846	848	Y-PQ	0	0	23	11	0	0
Total			262	133	240	120	220	114

Configuration 300:

Z (R +jX) in ohms per mile
0.4615 1.0651 0.1535 0.3849 0.1580 0.4236
0.4576 1.0780 0.1560 0.5017
0.4666 1.0482
B in micro Siemens per mile
5.3971 -0.6982 -1.1645
5.6765 -1.8319
5.9809

Configuration 301:

Z (R +jX) in ohms per mile
1.9300 1.4115 0.2327 0.6442 0.2359 0.5691
1.9157 1.4281 0.2288 0.5238
1.9219 1.4209
B in micro Siemens per mile
5.1207 -1.4364 -0.9402
4.9055 -0.5951
4.7154

Configuration 302:

Z (R +jX) in ohms per mile
2.7995 1.4855 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000
B in micro Siemens per mile
4.2251 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000
0.0000

Configuration 303:

Z (R +jX) in ohms per mile
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
2.7995 1.4855 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000
B in micro Siemens per mile
0.0000 0.0000 0.0000
4.2251 0.0000
0.0000

Configuration 304:

Z (R +jX) in ohms per mile

0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		1.9217	1.4212	0.0000	0.0000
				0.0000	0.0000
B in micro Siemens per mile					
	0.0000	0.0000	0.0000		
		4.3637	0.0000		
			0.0000		

مراجع:

- [1] D. A. Haughton and G. T. Heydt, "Synchronous measurements in power distribution systems," in *Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids*, ed: Springer, 2012, pp. 295-312.
- [2] S. Chowdhury and P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks*: The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [3] A. Keyhani, M. N. Marwali, and M. Dai, *Integration of green and renewable energy in electric power systems*: John Wiley & Sons, 2009.
- [4] P. A. Lynn, *Electricity from sunlight: An introduction to photovoltaics*: John Wiley & Sons, 2011.
- [5] E. M. Saber, S. E. Lee, S. Manthapuri, W. Yi, and C. Deb, "PV (photovoltaics) performance evaluation and simulation-based energy yield prediction for tropical buildings," *Energy*, 2014.
- [6] F. Bella, M. Imperiyka, and A. Ahmad, "Photochemically produced quasi-linear copolymers for stable and efficient electrolytes in dye-sensitized solar cells," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 289, pp. 73-80, 2014.
- [7] J.-W. Lee, T.-Y. Lee, P. J. Yoo, M. Grätzel, S. Mhaisalkar, and N.-G. Park, "Rutile TiO₂-based perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 2, pp. 9251-9259, 2014.
- [8] J. Qiu, Y. Qiu, K. Yan, M. Zhong, C. Mu, H. Yan, *et al.*, "All-solid-state hybrid solar cells based on a new organometal halide perovskite sensitizer and one-dimensional TiO₂ nanowire arrays," *Nanoscale*, vol. 5, pp. 3245-3248, 2013.
- [9] R. Yan and T. K. Saha, "Investigation of voltage stability for residential customers due to high photovoltaic penetrations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 651-662, 2012.
- [10] R. Shah, N. Mithulananthan, R. C. Bansal, and V. K. Ramachandaramurthy, "A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1423-1436, 1// 2015.
- [11] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control* vol. 7: McGraw-hill New York, 1994.
- [12] T. Van Cutsem and C. Vournas, *Voltage stability of electric power systems* vol. 441: Springer, 1998.
- [13] C. W. Taylor, *Power system voltage stability (Electric Power Research Institute Power System Engineering)* McGraw-Hill, 1994.
- [14] R. Viral and D. Khatod, "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 5146-5165, 2012.
- [15] K. Kawabe and K. Tanaka, "Analytical Method for Short-Term Voltage Stability Using the Stability Boundary in the P-V Plane," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 3041-3047, 2014.
- [16] J. Machowski, J. Bialek, and J. Bumby, *Power system dynamics: stability and control*, second ed.: John Wiley & Sons, 2011.

[17]همدانی گلشن، م، پایداری ولتاژ سیستمهای قدرت، انتشارات آستان قدس رضوی، ۱۳۸۶

- [18]G. B. Jasmon, L. H. Callistus, and C. Lee, "Maximizing voltage stability in distribution networks via loss minimization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 13, pp. 148-152, 6// 1991.
- [19]M. Chakravorty and D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 23, pp. 129-135, 2001.
- [20]D. Guiping and S. Yuanzhan, "A new index of voltage stability considering distribution network," in *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, 2009, pp. 1-4.
- [21]M. M. Aman, G. B. Jasmon, H. Mokhlis, and A. H. A. Bakar, "Optimal placement and sizing of a DG based on a new power stability index and line losses," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, pp. 1296-1304, 12// 2012.
- [22]V. V. S. N. Murty and A. Kumar, "Optimal placement of DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 69, pp. 246-256, 7// 2015.
- [23]<http://www.suna.org.ir/fa/home>.
- [24]https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics.
- [25]R. A. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic systems engineering*, Second ed.: CRC press, 2010.
- [26]F. M. González-Longatt, "Model of photovoltaic module in Matlab," *II CIBELEC*, vol. 2005, pp. 1-5, 2005.
- [27]R. Yan and T. K. Saha, "Investigation of voltage variations in unbalanced distribution systems due to high photovoltaic penetrations," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 2011, pp. 1-8.
- [28]"Power Electronics and Control in Grid-Connected PV Systems ECEN 2060," ece.colorado.edu/~ecen2060/materials/lecture_notes/GridPVsystem.pdf.
- [29]P. Baker, M. McGranaghan, T. Ortmeyer, D. Crudele, T. Key, and J. Smith, "Advanced Grid Planning and Operation," NREL/SR-581-42294. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory 2008.
- [30]E. GHIANI and P. Fabrizio, "Smart inverter operation in distribution networks with high penetration of photovoltaic systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, pp. 1-8, 2015.
- [31]J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. P. Guisado, M. A. M. Prats, *et al.*, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1002-1016, 2006.
- [32]C. Whitaker, J. Newmiller, M. Ropp, and B. Norris, "Distributed photovoltaic systems design and technology requirements," *Sandia/SAND2008-0946 P, Tech. Rep*, 2008.
- [33]Y. Liu, J. Bebic, B. Kroposki, J. De Bedout, and W. Ren, "Distribution system voltage performance analysis for high-penetration PV," in *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE*, 2008, pp. 1-8.
- [34]S. Achilles, S. Schramm, and J. Bebic, *Transmission system performance analysis for high-penetration photovoltaics*: National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [35]<http://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34752-grid-connected-pv->

- array/content//PVarray/PVarray_Grid_IncCondReg_det.mdl.
- [36] R. Yan and T. K. Saha, "Voltage variation sensitivity analysis for unbalanced distribution networks due to photovoltaic power fluctuations," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 1078-1089, 2012.
- [37] A. Wiszniewski, "New criteria of voltage stability margin for the purpose of load shedding," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1367-1371, 2007.
- [38] F. Andren, B. Bletterie, S. Kadam, P. Kotsampopoulos, and C. Bucher, "On the Stability of Local Voltage Control in Distribution Networks With a High Penetration of Inverter-Based Generation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 62, pp. 2519-2529, 2015.
- [39] کاظمی نژاد، محمد؛ مجید غفاریان فر و امین حاجی زاده، ۱۳۹۳، تعیین ظرفیت و مکان بهینه واحدهای تولید پراکنده به منظور بهبود پایداری ولتاژ و کاهش تلفات در سیستم های توزیع، اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، گرگان.
- [40] Y. Guangya, F. Marra, M. Juamperez, S. B. Kjaer, S. Hashemi, J. Østergaard, *et al.*, "Voltage rise mitigation for solar PV integration at LV grids," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 3, pp. 411-421, 2015.
- [41] M. Hasheminamin, V. G. Agelidis, V. Salehi, R. Teodorescu, and B. Hredzak, "Index-Based Assessment of Voltage Rise and Reverse Power Flow Phenomena in a Distribution Feeder Under High PV Penetration," *Photovoltaics, IEEE Journal of*, vol. 5, pp. 1158-1168, 2015.
- [42] G. J. Shirek and B. A. Lassiter, "Photovoltaic Power Generation: Modeling Solar Plants' Load Levels and Their Effects on the Distribution System," *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 19, pp. 63-72, 2013.
- [43] D. Q. Hung, N. Mithulanathan, and R. C. Bansal, "Integration of PV and BES units in commercial distribution systems considering energy loss and voltage stability," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1162-1170, 1// 2014.
- [44] F. J. Ruiz-Rodriguez, J. C. Hernández, and F. Jurado, "Voltage unbalance assessment in secondary radial distribution networks with single-phase photovoltaic systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 64, pp. 646-654, 1// 2015.
- [45] D. C. Garcia, A. L. F. Filho, M. A. G. Oliveira, O. A. Fernandes, and F. A. do Nascimento, "Voltage unbalance numerical evaluation and minimization," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 1441-1445, 10// 2009.
- [46] "IEEE 34 Node Test Feeder," <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders>, 2009.
- [47] K. V. Kumar and M. Selvan, "A simplified approach for load flow analysis of radial distribution network," *International Journal of Computer and Information Engineering*, vol. 2, p. 4, 2008.
- [48] W. Wu and B. Zhang, "A three-phase power flow algorithm for distribution system power flow based on loop-analysis method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 30, pp. 8-15, 2008.
- [49] IEEE, *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*: IEEE, 2000.
- [50] D. G. Photovoltaics, "IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," 2009.

Abstract:

The cost of energy for electric power generation, raise the level of productivity of the electric grid sectors. The interest in using solar energy to provide electricity visible programs. Improve voltage stability and thus increase the load on the distribution networks before the voltage collapse, as one of the most important criteria for determining the level of penetration of distributed generation (DG) in the electricity distribution network. Power distribution system characteristics, such as relatively high R/X lines and the widespread presence of solar photovoltaic (PV) as one of the most important sources of renewable energy, extensive studies to investigate the issues and take effective distribution networks. The events that have led to the collapse of the power grid voltage, we will assure the stability of the grid voltage to the widespread use of its resources. In this thesis, the analysis of voltage stability and power losses in distribution networks with the PV and the methods used to check the voltage stability. First of a voltage stability index and the curve of the voltage-power, PV effect on the stability of the losses in the distribution system is analyzed. In this thesis a practical solution for voltage stability analysis with the definition provided for PV penetration and of the power distribution system is implemented IEEE 34 nodes test feeder. The simulation results show that the method presented in this thesis has been based on the characteristics mentioned in the analysis of voltage stability and losses, show the effect of PV penetration.

Keywords —Distribution systems, penetration, photovoltaic(PV), voltage stability index, Loadability Limits.



University of Shahrood

Department of Electrical and Robotic Engineering

Power Group

Title:

***Voltage Stability and Power Losses in Distribution Systems
with Photovoltaic Penetration***

Student: Mr Majid Ghaffarianfar

Supervisor:

Dr. Amin Hajizadeh

Ms.c Thesis to obtain master's degree

December 2015