

ارائه روش جدید در کنترل ولتاژ شبکه توزیع ولتاژ متوسط در حضور منابع تولید پراکنده

مهدی محمدی^۱، سعادت احمدی حاجی^۲

^۱ کارشناسی ارشد برق-قدرت، کارشناس بهره‌برداری برق منطقه‌ای مازندران و گلستان

Mahdi.Mohammadi.Darzi@outlook.com

^۲ کارشناسی ارشد برق-قدرت، کارشناس بهره‌برداری برق منطقه‌ای مازندران و گلستان، واحد انتقال مرکز

Saadat.AhmadiHaji@gmail.com

چکیده

حضور تولیدات پراکنده بر ولتاژ شبکه‌های توزیع تأثیرات زیادی می‌گذارد که این تأثیرات می‌تواند از یک طرف باعث بهبود پروفیل ولتاژ و از سوی دیگر باعث بدتر شدن ولتاژ سیستم توزیع شود. در این مقاله از ظرفیت توان راکتیو تولیدات پراکنده برای بهبود وضعیت ولتاژ و جبران تخطی ولتاژ باس‌های سیستم توزیع استفاده شده است. در ابتدا روشی مستقیم برای پخش بار استفاده می‌شود که این روش مبتنی بر ماتریس جریان تزریقی به باس است. در ادامه برای جبران‌سازی تخطی ولتاژ باس‌ها از ماتریس ضرایب حساسیت استفاده می‌شود که این ضرایب یکبار محاسبه و در طول بکارگیری الگوریتم ثابت باقی می‌ماند. از الگوریتم PSO برای پیدا کردن ظرفیت بهینه DGها در هر مرحله استفاده شده است. دو سناریوی متفاوت برای روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است که یکبار تخطی ولتاژ را برای حالتی جبران می‌کند که شبکه دچار افت ولتاژ شده و بار دیگر برای حالتی که شبکه دچار اضافه ولتاژ شده است. شبکه مورد مطالعه شبکه توزیع ولتاژ متوسط ۳۳ باسه اصلاح شده IEEE است. روش پیشنهادی باعث بهبود پروفیل ولتاژ با حداقل تلفات سیستم توزیع ولتاژ متوسط در حضور منابع تولید پراکنده شده است.

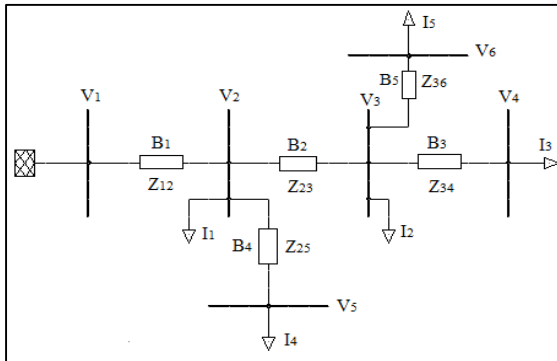
کلمات کلیدی

آنالیز حساسیت؛ پروفیل ولتاژ؛ تولیدات پراکنده؛ شبکه توزیع ولتاژ متوسط؛ الگوریتم بهینه‌سازی PSO

در شبکه شعاعی با حضور DG را می‌سازد. از این رو، یکی از مهمترین طرح‌های کنترلی در شبکه‌های توزیع، کنترل ولتاژ و توان راکتیو یا به عبارتی مدیریت توان راکتیو است که ولتاژ و توان راکتیو را در شبکه‌های توزیع تنظیم و کنترل می‌کند. کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع معمولاً توسط تپ‌چنجرهای با قابلیت تنظیم زیر بار، خازن‌ها و رگولاتورهای ولتاژ صورت می‌گیرد [۳]. یکی از روش‌های تنظیم ولتاژ برای شبکه‌های توزیع فشار متوسط، استفاده از ظرفیت تولید توان راکتیو DGها است که در [۴] ارائه شده است که این کار با استفاده از استخراج فاکتورهای حساسیت ولتاژ از ماتریس ژاکوبین، انجام شده است. همچنین، الگوریتمی برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت سیستم‌های توزیع شامل: برنامه

۱- مقدمه

امروزه، نفوذ و استفاده از تولیدات پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع به سرعت رو به گسترش است. به طور مرسوم، شبکه‌های توزیع، شبکه‌های پسیوی هستند که در آن توان راکتیو از سطح ولتاژ بالاتر به سطح ولتاژ پایین‌تر در جریان است [۱]. به طور کلی، تولید پراکنده را می‌توان تولید برق در شبکه توزیع یا در سمت مصرف‌کننده، تعرف کرد [۲]. تولید پراکنده می‌تواند با معکوس کردن جهت توان جاری شده در خط، باعث افزایش ولتاژ محلی گردد که این موضوع اهمیت کنترل ولتاژ



شکل (۱): شبکه توزیع ۶ باسه ساده

برای ایجاد ماتریس $BIBC$ ، جریان شاخه‌ها: B_1, B_2, B_3, B_4 و B_5 طبق قانون KCL ، بصورت توابعی متشکل از جریان‌های تزریقی به باس‌ها فرمول بندی می‌شود. برای مثال B_1 و B_2 ، را می‌توان بصورت معادله (۱) و (۲) بیان کرد:

$$B_1 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 \quad (1)$$

$$B_2 = I_2 + I_3 + I_5 \quad (2)$$

بنابراین، معادله (۳) ارتباط بین جریان تزریقی به باس‌ها و جریان شاخه‌های شبکه توزیع شکل (۱) را به کمک ماتریس $BIBC$ نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

حالت کلی معادله (۳) را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$[B] = [BIBC] [I] \quad (4)$$

که در معادله (۴)، $BIBC$ ماتریس تزریق جریان باس‌ها به جریان شاخه‌ها است. برای ایجاد ماتریس $BCBV$ ، معادلات مربوط به اختلاف ولتاژ باس‌ها با باس مرجع را می‌توان در نظر گرفت که بصورت ضرب امپدانس در جریان شاخه مورد نظر است. برای مثال، معادله (۵) ارتباط بین ولتاژ باس ۲ و جریان شاخه‌های شکل ۱ را نشان می‌دهد.

$$V_1 - V_2 = B_1 Z_{12} \quad (5)$$

بنابراین معادله (۵) که بیانگر ارتباط بین ولتاژ باس‌ها با جریان شاخه‌های است را می‌توان به کمک ماتریس $BCBV$ بیان کرد.

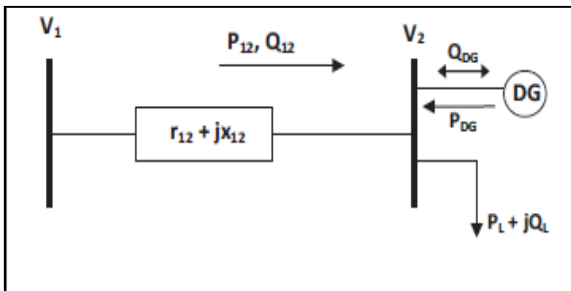
ریزی روزهای پیش‌رو و سیستم کنترل روزهای فعلی، در [۵] بسط داده شده است که بصورت مسئله بهینه‌سازی غیرخطی فرمول‌بندی شده است و با ضرایب حساسیت بدست آمده از محاسبات پخش بار، خطی می‌شود. طرح کنترل ولتاژ متمرکز، بر اساس مدل کنترل پیشگویانه (MPC) و با استفاده از شاخص‌های حساسیت در [۶] بررسی شده است. طرح هماهنگ برای کمینه کردن هزینه عملکرد (عملیاتی) سیستم از لحاظ هزینه انرژی تلف شده، هزینه انرژی هنگام خاموشی و هزینه پشتیبانی (تامین) توان راکتیو با حفظ محدودیت‌های سیستم در یک الگوریتم پخش بار بهینه فرمول بندی شده است، در [۷] آورده شده است. در [۴-۷]، برای استخراج ضرایب حساسیت، از ماتریس ژاکوبین استفاده می‌شود که ثابت نیست و با توجه به نقطه کار شبکه تغییر می‌کند. از این رو، در این مقاله روش کنترل ولتاژ ارائه می‌شود که با کمک الگوریتم بهینه‌سازی PSO، با تنظیم توان راکتیو شبکه توزیع ولتاژ متوسط، پروفیل ولتاژ شبکه را در محدوده مجاز تعیین شده، نگه دارد.

۲- روش مستقیم پخش بار در سیستم توزیع

شبکه‌های توزیع به دلیل برخی ویژگی‌های خاص مانند:

- ساختار شعاعی و یا مش ضعیف
- نسبت $\frac{R}{X}$ بالا
- تعداد گره‌ها و شاخه‌های زیاد
- توزیع نامتعادل بار
- حضور تولیدات پراکنده

در دسته سیستم‌های قدرت نامطلوب برای روش‌های سنتی پخش بار مانند: نیوتن رافسون و گوس سایدل قرار می‌گیرد. ساختار ساده و شعاعی شبکه‌های توزیع امکان استفاده از روش‌های بسیار ساده را برای حل مسئله پخش بار آن‌ها می‌دهد که از جمله این روش‌ها، روش مستقیم است. ایده روش پخش بار مستقیم در سیستم‌های توزیع در [۸] ارائه شده است. از مزیت‌های مهم این روش‌ها سادگی، کارایی بهتر و سرعت بالای آن است. رویکرد پخش بار مستقیم، براساس دو ماتریس است: (۱) ماتریس $BIBC$ که با توجه به قوانین KCL ، بیانگر ارتباط بین جریان‌های تزریقی به باس‌ها و جریان شاخه‌ها است، (۲) ماتریس $BCBV$ ، جریان شاخه‌ها را به ولتاژ باس‌ها مرتبط می‌سازد. سیستم توزیع ۶ باسه ساده شکل (۱) را برای توضیح روش پخش بار استفاده شده در این مقاله، در نظر بگیرید.



شکل (۲): سیستم شعاعی ۲ با سه

جایی که r_{12} و x_{12} به ترتیب مقاومت و راکتانس خط بین دو باس ۱ و ۲ است. حال اگر DG به باس ۲ وصل شود، نحوه جاری شدن توان بین دو نقطه ۱ و ۲ تغییر می‌کند. در این حالت معادله (۱۲) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$V_1 - V_2 = (P_L - P_{DG})r_{12} + (Q_L \pm Q_{DG})x_{12} \quad (13)$$

جایی که P_{DG} و Q_{DG} توان اکتیو و راکتیو واحد DG است.

از معادله (۱۳) می‌توان دریافت که تغییرات ولتاژ در باس ۲ تابعی از توان راکتیو و اکتیو خط و DG است، اما درجه تاثیر آن در ولتاژ باس ۲ بستگی به R_{12} و X_{12} است. در حالت کلی معادله (۱۳) می‌تواند به صورت زیر نوشت:

$$V_i - V_j = P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij} \quad (14)$$

که در این رابطه:

P_{ij} : توان اکتیو جاری بین باس‌های i و j است ($i \neq j$).

Q_{ij} : توان راکتیو جاری بین باس‌های i و j است ($i \neq j$).

با توجه به این واقعیت که هدف، کنترل توان راکتیو سیستم در برخی از باس‌ها است، معادله (۱۵)، حساسیت ولتاژهای سیستم با توجه به تزریق توان در باس‌ها را بیان می‌کند.

$$[\Delta V] = [R][P] + [X][Q] \quad (15)$$

که در این رابطه داریم:

$[P]$: بردار تزریق توان اکتیو در باس‌های سیستم

$[Q]$: بردار تزریق توان راکتیو در باس‌های سیستم

$[R]$: بردار حساسیت ولتاژهای سیستم به تزریق توان اکتیو به باس‌ها

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & 0 & 0 & Z_{25} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

در حالت کلی معادله (۶) را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (7)$$

با استفاده از (۴) و (۷)، رابطه مستقیم بین ΔV و I از طریق ماتریس DLF برقرار می‌شود.

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] = [DLF][I] \quad (8)$$

ماتریس DLF یک بار در مطالعه پخش بار محاسبه می‌شود و این ماتریس در طول برنامه کنترل ولتاژ، ثابت باقی می‌ماند، زیرا از ساختار توپولوژیکی شبکه گرفته شده است. به منظور حل مساله پخش بار (۸) از یک روش مبتنی بر تکرار استفاده می‌شود. بردار ΔV و I توسط معادلات (۹) و (۱۱) بروز می‌شود.

$$I_i^k = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad (9)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I^k] \quad (10)$$

$$[V^{k+1}] = [V^0] - [\Delta V^{k+1}] \quad (11)$$

جایی که P_i و Q_i به ترتیب، بردار توان اکتیو و راکتیو بار متصل به باس i ام است و V^k بردار ولتاژهای سیستم در تکرار k ام است و همچنین، بردار V^0 مقدار اولیه ولتاژ است که برای همه i پریونیت فرض می‌شود.

۳- روش آنالیز حساسیت ولتاژ

روش آنالیز حساسیت، یک رویکرد مستقیم برای محاسبه ماتریس حساسیت، مستقل از نقاط کار شبکه و مناسب برای سیستم‌های توزیع ولتاژ متوسط است. سیستم شعاعی ۲ با سه شکل (۲) در نظریه‌گیری. در حالت بدون DG، توان جاری شده بین نقطه ۱ و ۲ (P_{12} ، Q_{12}) برابر تقاضای بار در باس ۲ ($P_L + jQ_L$) است و افت ولتاژ برحسب پریونیت در باس ۲ بوسیله معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$V_1 - V_2 = P_{12}r_{12} + Q_{12}x_{12} \quad (12)$$

راکتیو همه DGها انتخاب شده است [۹]:

$$\text{Minimize objective function: } \sum_{x=1}^N |\Delta Q_{DGx}| \quad (20)$$

جایی که N تعداد DGهایی است که در کنترل توان راکتیو شرکت می‌کنند. پس از اجرای برنامه پخش بار اولیه، اگر ولتاژ از حد مجاز در سیستم تخطی کند باسی که بزرگترین تخطی از حد مجاز را دارد، انتخاب می‌شود. سپس، مقدار بزرگترین تخطی ولتاژ از حد مجاز بالا یا پایین محدوده، محاسبه می‌شود (ΔV_{worst}) که تعیین کننده، مقدار مناسب تغییر ولتاژ در سیستم است به طوری که، ولتاژ آن باس را به محدوده مجاز برگرداند (ΔV_{proper}). از معادله (۲۱) برای محاسبه مقدار مناسب تغییر ولتاژ به عبارت دیگر حل مسئله ولتاژ باس دارای تخطی استفاده می‌شود:

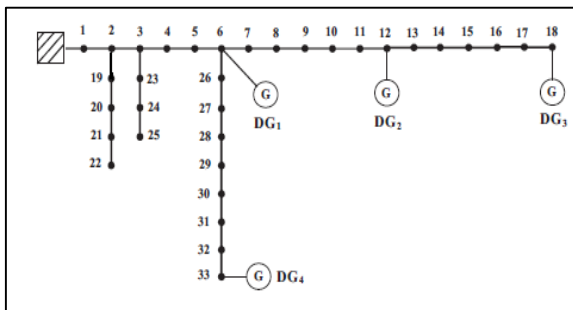
$$\Delta V_{proper} = -\Delta V_{worst} = \sum_{x=1}^N \frac{\partial V_{worst}}{\partial Q_{DGx}} \Delta Q_{DGx} \quad (22)$$

جایی که $\frac{\partial V_{worst}}{\partial Q_{DGx}}$ حساسیت ولتاژ بدترین باس به تغییرات توان راکتیو DG شماره x است. میزان مناسب تغییر ولتاژ (ΔV_{proper}) برای حل مسئله ولتاژ بدترین باس، پارامتر تعریف شده ای است اما ($x=0, 1, \dots, n$) ΔQ_{DGx} متغیرهای نامشخصی هستند که باید بصورت بهینه انتخاب شوند. در واقع، ظرفیت DIFGها و ماشین‌های سنکرون برای جبران‌سازی توان راکتیو بوسیله چندین فاکتور ارائه شده در [۹] محدود می‌شود. محدودیت‌های توان راکتیو DGها در مسئله به عنوان قید نابرابری، معادله (۲۳)، استفاده شده است.

$$Q_{DG, min} \leq Q_{DGx} \leq Q_{DG, max} \quad (23)$$

۴-۲- سیستم مورد مطالعه

در شکل (۳) دیاگرام تک خطی شبکه توزیع شعاعی ۳۳ باس نشان داده شده است که پارامترهای آن در مرجع [۱۱] آورده شده است.



شکل (۳): شبکه توزیع ۳۳ باسه IEEE اصلاح شده با حضور DG

[X]: بردار حساسیت ولتاژهای سیستم به تزریق توان راکتیو به باس‌ها

عنصر (n, m) بردار [R] جمع مقاومت شاخه‌ها است. به عنوان مثال، به منظور به دست آوردن عنصر (۳,۲) از [R]، شاخه بین باس‌های ۱ و ۲ و همچنین شاخه بین باس ۲ و ۳ که در آن هم P_3 و P_4 جاری می‌شوند، در نظر گرفته می‌شوند. چون باس ۱، باس مرجع است، ولتاژ آن همیشه ثابت است ($\frac{\partial V_i}{\partial P_i} = \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} = 0$). بنابراین عنصر (۳,۲) از ماتریس R ($R_{3,2}$) که حساسیت ولتاژ در باس ۴ می‌دهد با توجه به توان اکتیو در باس ۳ معادله (۱۶) را می‌دهد:

$$\frac{\partial (V_1 - V_4)}{\partial P_3} = -\frac{\partial V_4}{\partial P_3} = P_{3,2} = r_{12} + r_{23} \quad (16)$$

همه ضرایب حساسیت با توجه به معادلات (۱۷) و (۱۸) بدست می‌آیند.

$$\frac{\partial V_m}{\partial P_n} = -R_{m-1, n-1} \quad (17)$$

$$\frac{\partial V_m}{\partial Q_n} = -X_{m-1, n-1} \quad (18)$$

ضرایب حساسیت با در نظر گرفتن راستای توان اکتیو و راکتیو جاری شده، ساخته می‌شود. ماتریس R (یا X) ارتباط بین توان اکتیو (یا راکتیو) تزریقی باس‌ها و ولتاژ باس‌ها را نشان می‌دهد. از همین رویکرد برای توسعه ماتریس DLF در مطالعه پخش بار استفاده می‌شود. تنها تفاوت ماتریس DLF، این است که هر آرایه آن شامل مقاومت و راکتانس بصورت مختلط است:

$$[DLF] = [R] + j[X] \quad (19)$$

بنابراین، ضرایب حساسیت ولتاژ از ماتریس DLF، در مطالعه پخش بار بدست می‌آید. بخش حقیقی هر آرایه ماتریس DLF ماتریس R و بخش موهومی آن ماتریس X را می‌دهد.

۴- شبیه‌سازی

در این بخش پس از فرمولبندی مسئله و تعریف تابع هدف و قید آن، سیستم مورد تحقیق معرفی می‌گردد. از الگوریتم بهینه‌سازی PSO و پخش باری مبتنی بر رابطه مستقیم ولتاژ و جریان سیستم برای حل مسئله کنترل ولتاژ شبکه توزیع ۳۳ باسه اصلاح شده IEEE ولتاژ متوسط براساس روش ماتریس حساسیت ولتاژ استفاده می‌شود.

۴-۱- فرمولبندی مسئله

در روش پیشنهادی، تابع هدف با فرض حداقل کردن اندازه تغییرات توان

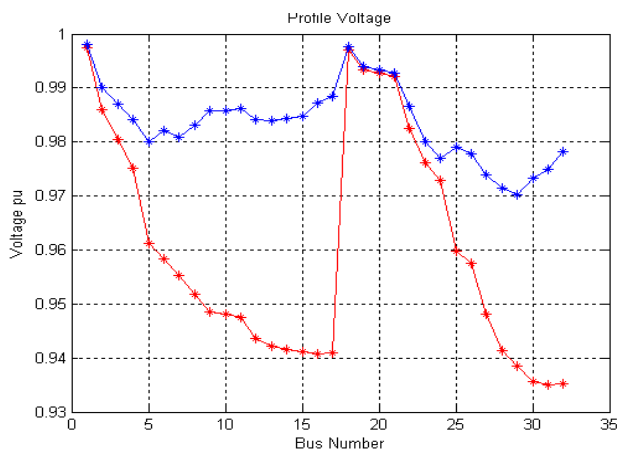
۵-۱- حالت اول: بار کامل - کمترین تولید

در این حالت، همه بارهای سیستم در بیشترین مقدار توان نامی هستند و میزان تولید توان اکتیو DGها، ۱۵٪ توان نامی آن است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی حالت اول که در جدول (۲)، آورده شده است، باس شماره ۳۲ به عنوان بدترین باس در پخش بار اولیه انتخاب می‌شود و سپس با مشارکت DGهای شماره ۲ و ۴ مسئله کنترل توان راکتیو حل گشته و ولتاژ باس ۳۲ به محدوده مجاز بر می‌گردد.

جدول (۲): خروجی برنامه در حالت اول

واحد	تکرار سوم	تکرار دوم	تکرار اول	
ولتاژ باس خاخی	۰/۹۶۶۴ pu	۰/۹۶۵۱ pu	۰/۹۳۵۱ pu	
شماره باس خاخی	۳۰	۱۷	۳۲	
ΔV_{worst}	۰/۰۰۳۶ pu	۰/۰۰۴۹ pu	۰/۰۳۴۹ pu	
ΔV_{proper}	-۰/۰۰۳۷ pu	-۰/۰۰۵۵ pu	-۰/۰۳۵۰ pu	
ΔQ_{DG1}	-۴۲۵/۹ kVAR	.	.	
ΔQ_{DG2}	.	.	-۷۱۶ kVAR	
ΔQ_{DG3}	.	-۱۰۳۲ kVAR	.	
ΔQ_{DG4}	.	.	-۹۵۰ kVAR	
Gbest	۰/۴۲۵۹	۰/۱۰۳۲	۱/۶۶۶	

پس از اصلاح ولتاژ باس ۳۲ و اجرای پخش بار مجدد، باس شماره ۱۷ بدترین باس در نظر گرفته می‌شود و با مشارکت DG شماره ۳ ولتاژ آن به محدوده مجاز بر می‌گردد. در انتها نیز باس شماره ۳۰ که بیشترین تخطی ولتاژ را دارد اصلاح می‌گردد. شکل (۵) ولتاژ باس‌های سیستم توزیع را پس از پخش بار اولیه و همچنین پس از اعمال روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

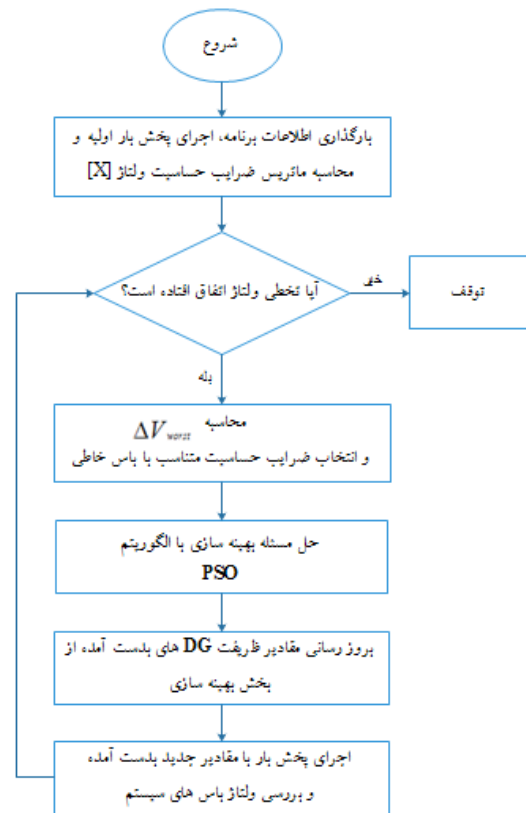


شکل (۵): ولتاژ باس‌ها پس در حالت اول

کل توان‌های اکتیو و راکتیو بارهای سیستم به ترتیب ۳,۷۲ مگاوات و ۲,۳ مگاوار است. ولتاژ سیستم ۱۲,۶ کیلووات است که شامل چهار واحد DG در باس های ۶، ۱۲، ۱۸ و ۳۳ است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

فلوچارت روند اجرای برنامه کنترل ولتاژ در شکل (۴)، آورده شده است. دو سناریو متفاوت برای شبیه سازی توانایی رویکرد پیشنهادی در حل مسئله کنترل ولتاژ در حالت افت ولتاژ و اضافه ولتاژ ارائه شده است.



شکل (۴): فلوچارت شبیه‌سازی

مدل خطی منحنی قابلیت ژنراتورهای DFIG در جدول (۱)، آورده شده است. بیشینه توان راکتیو تابعی از میزان توان اکتیو جاری شده از ژنراتور است.

جدول (۱): مدل خطی شده منحنی قابلیت ژنراتور DFIG

نقطه	توان اکتیو P	Q_{max}/Q_{min} برحسب درصد (%)
۱	۰	±۹۵
۲	۲۵٪	±۹۵
۳	۵۰٪	±۹۰
۴	۱۰۰٪	±۶۰

داشته است. در سناریوی افت ولتاژ با کمک ضرایب حساسیت استخراج شده از ماتریس DLF، بدترین باس‌ها اصلاح شده و در نتیجه ولتاژ باس‌های سیستم در محدوده مجاز قرار گرفته است. در سناریوی اضافه ولتاژ نیز با در نظر گرفتن منحنی قابلیت ژنراتور DFIG و ضرایب حساسیت مورد نظر و به کمک الگوریتم بهینه‌سازی PSO، باس شماره ۱۸ پس از سومین تکرار، اصلاح گردید و در نتیجه توانایی روش آنالیز حساسیت برای دو سناریو اثبات شده است.

مراجع

- [1] Mahmud, M. A., Hossain, M. J., Pota, H. R., Nasiruzzaman, A. B. M., "distributed generation using reactive power compensation" IECON - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Page(s): 985 – 990, 2011.
- [2] Chiradeja, P., Ramakumar, R., "An approach to quantify the technical benefits of distributed generation," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol: 19, Page(s): 764 - 7734, Dec- 2004.
- [3] Gao, C., Redfern, M., "A review of voltage control techniques of networks with distributed generations using on-load tap changer transformers" in Universities Power Engineering Conference (UPEC) 2010 45th International, pp. 1-6, 2010.
- [4] Zhou, Q., Bialek, J., "Generation curtailment to manage voltage constraints in distribution networks" in IET Transmission and Distribution, vol. 1, 2007.
- [5] Paolone, M., Silvestro, F., "Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources" IEEE Syst, vol: 4, no: 3, pp. 313-322, Sep. 2010.
- [6] Valverde Mora, G., Van Cutsem, T., "Model Predictive Control of Voltages in Active Distribution Networks" IEEE Transactions on Smart Grid, vol: 4, pp. 2152-2161, Dec-2013.
- [7] Pilo, F., Pisano, G., Soma, G.G., "Optimal Coordination of Energy Resources With a Two-Stage Online Active Management" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol: 58, Page(s): 4526 - 4537, Oct. 2011.
- [8] Balamurugan, K., Dipti Srinivasan, "Review of Power Flow Studies on Distribution Network with Distributed Generation" IEEE PEDS. 51, 2011, pp: 1-7.
- [9] Bakhshideh Zad, B., Hasanvand, H., Lobry, J., Vallée, F "Optimal reactive power control of DGs for voltage regulation of MV distribution systems using sensitivity analysis method and PSO algorithm". Electrical Power and Energy Systems. vol: 68 .pp: 52–60, 2015.
- [10] Engelhardt, S., Erlich, I., Feltes, C., Kretschmann, J. and Shewarega, F., "Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generators" IEEE Trans. Energy Conv. vol. 26 no. 1 pp. 364-372 Mar. 2011.
- [11] Baran, ME., Felix, Wu., "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing " IEEE Trans Power Delivery; 2, pp: 1-4. 1989.

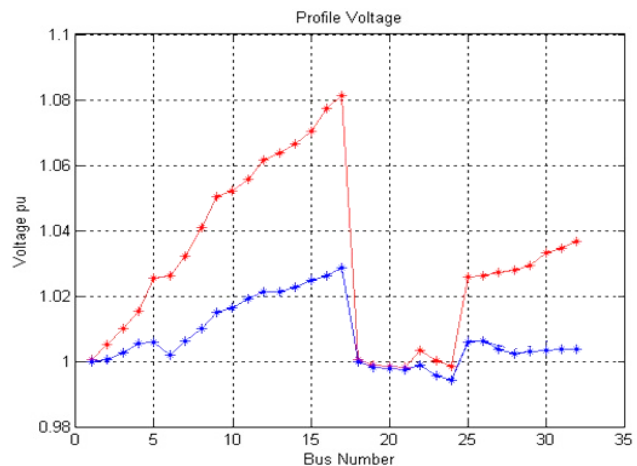
۵-۲- حالت دوم: مصرف کم - تولید بیشینه

در این حالت بارها و DG ها به ترتیب ۵۰٪ و ۹۰٪ مقدار نامیشان در نظر گرفته شده اند. با استفاده از جدول (۱)، محدوده تغییرات توان راکتیو DGها، تعیین شده است.

جدول (۳): خروجی برنامه در حالت دوم

واحد	تکرار سوم	تکرار دوم	تکرار اول	
ولتاژ باس خاکی	۰/۹۶۶۰	۱/۰۳۷۶	۱/۰۸۱۴	pu
شماره باس خاکی	۱۸	۱۸	۱۸	-
ΔV_{worst}	-۰/۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۶۱	-۰/۰۵۱۴	pu
ΔV_{proper}	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۸۱	۰/۰۵۳۴	pu
ΔQ_{DG1}	۲۳۱/۱	۴۰۱/۸	۰	kVAR
ΔQ_{DG2}	۰	۱۹/۲	۶۴۰/۸	kVAR
ΔQ_{DG3}	۰	۰	۶۶۰	kVAR
ΔQ_{DG4}	۰	۴۷۷/۰۱	۰	kVAR
Gbest	۳۰۹/۳	۰/۹۵۵۲	۱/۲۲۰۵	kVAR

پس از پخش بار اولیه، از شکل (۶) مشاهده می‌شود که قبل از اعمال روش کنترل ولتاژ، باس شماره ۱۸ بیشترین تخطی ولتاژ از محدوده بالا مجاز را دارد لذا با اعمال روش پیشنهادی این اضافه ولتاژ در طی سه تکرار جبران می‌شود.



شکل (۶): شکل موج ولتاژ در حالت دوم

۶- نتیجه گیری

همانطور که از نتایج شبیه سازی مشاهده شد، روش آنالیز حساسیت ارائه شده در دو سناریوی افت ولتاژ و اضافه ولتاژ عملکرد قابل قبولی