

## تأثیر تولید پراکنده بر روی پروفیل ولتاژ و تلفات سیستم‌های توزیع

ابراهیم سلطانی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز [ebrahimsoltani5977@gmail.com](mailto:ebrahimsoltani5977@gmail.com)

سید بهرام حسینی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه محقق اردبیلی [sbh.hosseiniy99@gmail.com](mailto:sbh.hosseiniy99@gmail.com)

### چکیده

یک الگوریتم پیشرو-پسرو جدید بر اساس مدل بار توان ثابت برای تحلیل سیستم‌های توزیع شعاعی، ارائه می‌شود. در روش ارائه شده از توان اکتیو و راکتیو بعنوان متغیرهای پخش بار استفاده می‌شود. مدل ریاضی انواع گوناگون تولید پراکنده (DG) بعنوان گره‌های PQ، PV، PQ(V) در برنامه پخش توان، مدل‌سازی می‌شوند. پروفیل ولتاژ و تلفات توان اکتیو قبل و پس از معرفی DG به سیستم توزیع شعاعی بر اساس واحدهای DG در مدهای مختلف، محاسبه می‌شوند. سیستم آزمایش 33 باسه IEEE برای بدست آوردن نتایج استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل‌های انتخاب شده، محل و ظرفیت متفاوت DG می‌تواند به میزان بسیار زیادی تلفات و ولتاژ سیستم را تحت تأثیر قرار دهند.

کلمات کلیدی: پروفیل ولتاژ، DG، سیستم توزیع شعاعی، پخش بار، حرکت پیشرو-پسرو

## 1. مقدمه

تولید پراکنده (DG) بیان‌کننده استفاده از واحدهای تولیدی کوچک هست که در نقاط استراتژیک سیستم قدرت الکتریکی در نزدیکی مراکز بار نصب شده‌اند. تکنولوژی‌های DG شامل توربین‌های گازی کوچک، میکرو توربین‌ها، پیل‌های سوختی، انرژی بادی و خورشید و غیره هستند. در سیستم توزیع DG می‌تواند سودهای را برای مصرف‌کننده و شرکت‌های برق مخصوصاً در مکان‌های که تولید متمرکز غیر عملی یا سیستم انتقال دارای نقص است، داشته باشد [1,2]. با این وجود معرفی DG می‌تواند ساختار سیستم توزیع را تغییر دهد و تاثیر بسیار زیادی بر روی پخش توان، پروفیل ولتاژ و پایداری داشته باشد [3,4]. میزان این تاثیرات بستگی به نوع، محل و ظرفیت DG دارد. شاخص نرخ ولتاژ در [5] و [6] برای آنالیز پروفیل ولتاژ قبل و بعد از معرفی DG، ارائه شده است. مرجع [6] تاثیر تغییر محل و ظرفیت DG بر روی پروفیل ولتاژ و تلفات توان سیستم توزیع را بررسی می‌کند. با این وجود هر دو آنها DG را بعنوان گره‌های نوع PQ مدل کرده‌اند. در [7] روش‌های تحلیلی برای جابجایی بهینه DGها با ضریب توان واحد در سیستم قدرت، ارائه شده‌اند.

این مقاله تولیدات پراکنده گوناگون را به بترتیب به سه نوع PQ، PV و PQ(V) تقسیم می‌کند. علاوه بر این یک راه‌حل برای پخش توان بر اساس تکنیک حرکت پیشرو-پسرو ارائه می‌دهد. روش ارائه شده بوسیله شبیه‌سازی بر روی سیستم آزمایش 33 باسه IEEE برای بدست آوردن تاثیر بر روی ولتاژ و تلفات توان اکتیو با محل‌های گوناگون و خروجی متفاوت DGها، مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

## 2. مدلسازی DG برای محاسبه پخش توان

بصورت کلی فقط گره‌های اسلک و PQ در سیستم‌های توزیع سنتی وجود دارند. اما بدلیل مدهای گوناگون کاری DGها و نوع اتصال آنها به شبکه، مدل‌های ریاضی گوناگونی برای DG بر اساس الگوریتم‌های خاص استفاده می‌شود. انواع DG رایج و نوع گره متناظر با آن در جدول 1 نشان داده شده است.

نوع گره	نوع DG
PQ	(a) DG از طریق ژنراتور سنکرون با مد کنترل تحریک برای کنترل ضریب توان به شبکه متصل می‌شود (b) سیستم‌های فوتوولتائیک، پیل‌های سوختی، میکرو توربین‌ها، و بخشی از توربین‌های بادی به شبکه از طریق تجهیزات الکترونیک قدرت متصل می‌شوند (مدار کنترل اینورتر برترتیب برای کنترل P و Q طراحی می‌شود)
PV	(a) DG از طریق ژنراتور سنکرون با مد کنترل تحریک برای کنترل ولتاژ به شبکه متصل می‌شود. (b) سیستم فوتوولتائیک، پیل‌های سوختی و غیره از طریق یک اینورتر با مد کنترل ولتاژ به شبکه متصل می‌شود. (c) سیستم‌های فوتوولتائیک، پیل‌های سوختی، میکرو توربین‌ها، و بخشی از توربین‌های بادی به شبکه از طریق تجهیزات الکترونیک قدرت متصل می‌شوند (مدار کنترل اینورتر برترتیب برای کنترل P و V طراحی می‌شود)
PQ(V)	(a) توربین‌های بادی از طریق واسط موتور آسنکرون به شبکه متصل می‌شوند (b) DG از طریق ژنراتور سنکرون بدون تجهیزات تحریک به شبکه متصل می‌شود

جدول 1: نوع گره DG برای محاسبه پخش توان

## 2.2 مدل کردن DG بعنوان گره PQ

واحدهای DG که بعنوان گره PQ مدل می‌شوند را می‌توان بعنوان بارهای PQ منفی در محاسبه پخش توان در نظر گرفت.

معادله زیر آنها را توصیف می‌کند:

$$\begin{cases} P = -P_s \\ Q = -Q_s \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه با P و Q بترتیب بوسیله توان اکتیو و راکتیو DG تولید می‌شوند.

## 2. 3 مدل کردن DG بعنوان گره PV

برای گره PV، خروجی توان اکتیو و ولتاژ ژنراتور مشخص می‌شوند.

این مدل بصورت زیر توصیف می‌شود:

$$\begin{cases} P = -P_s \\ U = U_s \end{cases} \quad (2)$$

## 2. 4 مدل کردن DG بعنوان گره PQ(V)

برای گره PQ(V)، فرض می‌کنیم که P ثابت است، خروجی توان راکتیو به ولتاژ باس ژنراتور مربوط می‌شود.

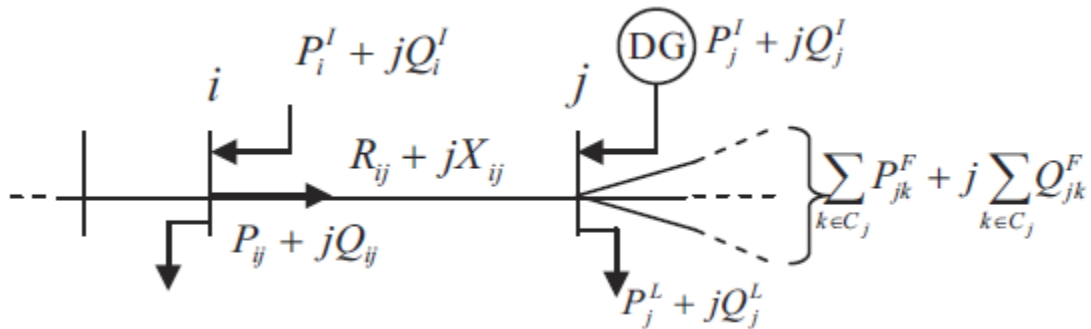
این مدل بصورت زیر توصیف می‌شود:

$$\begin{cases} P = -P_s \\ Q = -f(V) \end{cases} \quad (3)$$

## 3. حل پخش توان

### 3. 1 الگوریتم پخش توان با حرکت پیشرو-پسرو

یک سیستم توزیع شعاعی در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1: یک شبکه توزیع شعاعی

برای هر شاخه  $l(i, j)$  فرض می‌کنیم DG‌های که توان  $P_j^l + jQ_j^l$  خروجی‌شان است به گره  $j$  متصل می‌شوند و سپس DG معادل بار با توان  $-(P_j^l + jQ_j^l)$  است.

مهمترین محتوای الگوریتم تکراری که برای حل سیستم شعاعی بکار می‌رود بصورت زیر است:

(a) دامنه ولتاژ تمام گره‌ها را  $U^{(0)}$  بعنوان تنظیم کن.

(b) حرکت پس‌خور برای جمع کردن توان شاخه. شروع از شاخه‌های متصل به باس‌های انتهایی و حرکت به سمت گره پایه، توان خروجی در شاخه  $L$  بصورت زیر است:

$$P_{ij} = P_j^L + \sum_{k \in C_j} P_{jk}^F - P_j^l + \Delta P_{ij} \quad (4)$$

$$Q_{ij} = Q_j^L + \sum_{k \in C_j} Q_{jk}^F - Q_j^l + \Delta Q_{ij} \quad (5)$$

در رابطه بالا  $P_{ij}^l, Q_{ij}^l$ ، توان فرستاده شده شاخه  $L$  است،  $a$  و  $j$  بیانگر گره فرستنده و دریافت‌کننده شاخه  $L$  هستند،

توان اکتیو و راکتیو در گره  $j$  هستند.  $P_j^l, Q_j^l$  توان تزریق شده DG هستند.  $C_j$  مجموعه‌ای از شاخه‌های که به گره انتهایی

شاخه  $L$  متصل شده‌اند.  $P_{jk}^F, Q_{jk}^F$  توان شاخه  $k$  هستند. تلفات توان شاخه  $L$  هستند.  $\Delta P_{ij}, \Delta Q_{ij}$

(3) حرکت پیش رو برای آپدیت کردن ولتاژ گره‌ها. شروع از شاخه اول که به گره اسلک متصل شده است و حرکت به سمت شاخه‌های انتهایی:

$$U_j = \sqrt{\left(U_i - \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{U_i}\right)^2 + \left(\frac{P_{ij}X_{ij} - Q_{ij}R_{ij}}{U_i}\right)^2} \quad (6)$$

در رابطه بالا  $R_{ij}$  و  $X_{ij}$  بترتیب بیانگر مقاومت و راکتانس شاخه L هستند.

حل برای پخش بار توزیع می‌تواند بوسیله معادله 4 تا 6 بدست آید. تاکید می‌شود که مهمترین بخش از این روش بدست آوردن توان تزریق شده  $(P^l, Q^l)$  DG ها است.

### 3.2 جا دادن واحدهای DG در حل پخش توان

مهمترین ایده‌ای این مقاله در نظر گرفتن DG ها بعنوان بارهای منفی هست. معادله 1 و 2 را می‌توان برای بدست آوردن  $P^l, Q^l$  (که در بخش 1.2 بیان شد) هنگامیکه DG ها بعنوان گره‌های PQ یا PV در حل پخش توان مدل می‌شوند، استفاده کرد. برای DG ای که بوسیله گره PV ارائه می‌شود، توان راکتیو برای حذف مقدار مشخص ولتاژ مورد نیاز است. این مقاله از روش ارائه شده در [7] استفاده می‌کند، معادله بصورت زیر است:

$$X\Delta Q = \Delta U \quad (7)$$

بنابراین

$$\Delta Q = X^{-1}\Delta U \quad (8)$$

در رابطه بالا  $X$  ماتریس  $n \times n$  راکتانس حساسیت توالی مثبت متناظر با گره‌های PV است و  $n$  تعداد آنها است.  $X$  حل المان قطری  $x_{ii}$  و المان غیر قطری  $x_{ij}$  در [8] معرفی شده است.  $\Delta Q$  بردار تزریق توان راکتیو  $n \times 1$  متناظر با گره‌های PV است.  $\Delta U$  بردار  $n \times 1$  عدم تطبیق‌های ولتاژ توالی مثبت متناظر گره‌های PV است.

بعد از هر تکرار توان راکتیو تزریق شده در گره‌های PV بصورت زیر آپدیت می‌شوند:

$$Q^{k+1} = Q^k + \Delta Q^k \quad (9)$$

در رابطه بالا  $k$  شماره تکرار است.

#### 4. نتایج عددی

یک سیستم توزیع شعاعی 33 باسه آزمایشی برای آنالیز تاثیر DG بر روی پروفیل ولتاژ و تلفات سیستم توزیع، انتخاب می‌شود. ساختار توپولوژیکی و پارمترهای سیستم شبکه 33 باسه از [9] بدست آورده شده‌اند. توان بر روی 10 مگا وات تنظیم می‌شود، ولتاژ 10.5 کیلو ولت است و همگرایی  $\varepsilon < 10^{-4}$  است.

برای اطمینان از اینکه شبکه کاملاً از نوع جذبی است، فرض می‌شود که همیشه بار بزرگتر از ظرفیت DG است. نتایج محاسبه پخش توان ولتاژ گره‌ها برای گره‌های 0 تا 17 در فیدر اصلی در شکل‌های 2 تا 7 نشان داده شده است.

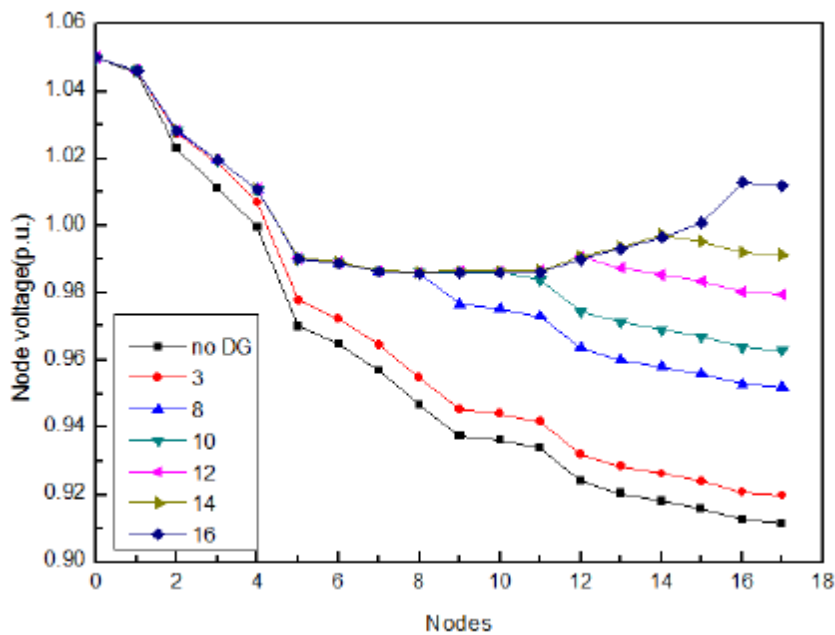
#### 4.1 تاثیر محل‌های گوناگون DG بر روی پروفیل ولتاژ و تلفات

بمنظور آنالیز تاثیر محل‌های گوناگون DG بر روی پروفیل ولتاژ و تلفات، سه نوع DG مختلف در گره‌های گوناگون با ظرفیت ثابت به شبکه معرفی خواهد شد.

#### 4.1.1 تاثیر بر روی پروفیل ولتاژ

(1) پروفیل ولتاژ گره وقتی که DG بعنوان گره PQ است

یک DG بعنوان گره PQ بترتیب به گره‌های 3، 8، 10، 12، 14، 16 معرفی می‌شود. توان ظاهری آن  $S=500+j500$  KVA است. نتایج در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2: DG بعنوان گره PQ

شکل 2 مقایسه پروفیل ولتاژ بدون DG و هنگامیکه DG بعنوان گره PQ به گره‌های مختلف معرفی می‌شود را نشان می‌دهد.

نتایج زیر را می‌توان استخراج کرد:

(a) ولتاژ تمام گره‌ها بعد از معرفی DG به شبکه بهبود پیدا کرده است

(b) از طریق مقایسه، می‌توان فهمید که هر چه DG به ترمینال‌های فیدر نزدیکتر باشد، بهبود ولتاژ بهتر است.

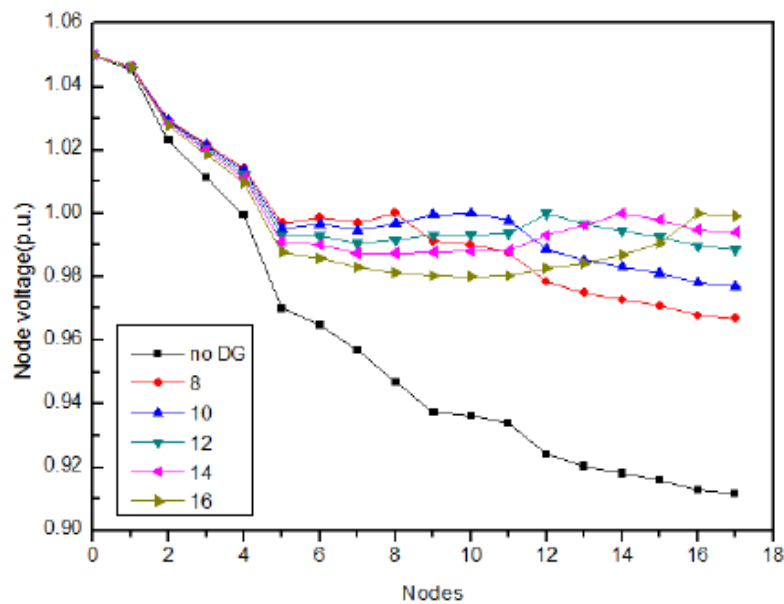
(c) ولتاژ ترمینال گره با حضور DG دیگر پایین‌ترین مقدار نیست. علاوه بر این ولتاژهای گره بعد از گره‌ای که DG به آن معرفی شده است بصورت واضح بهبود پیدا کرده است و قبل از گره در همان مقدار قبلی باقی می‌ماند.

(2) پروفیل ولتاژ گره‌ها وقتی که DG بعنوان گره PV است



یک DG بعنوان گره PV به ترتیب به گره‌های 8، 10، 12، 14 و 16 معرفی می‌شود. توان اکتیو آن  $P=500\text{ kw}$  است و ولتاژ آن  $V_s=10\text{ kv}$  است

شکل 3 مقایسه پروفیل ولتاژ بدون DG و با DG بعنوان گره PV که به گره‌های مختلف معرفی می‌شود را نشان می‌دهد.



شکل 3: DG بعنوان گره PV

(a) در مقایسه با گره PQ، گره PV دارای بهبود ظاهری بیشتری در پروفیل ولتاژ است که دلیل آن تاثیر تزریق توان راکتیو است.

(b) ولتاژ گره وقتی که DG به شبکه معرفی می‌شود در یک مقدار مشخصی حفظ میشود و ولتاژ گره‌های دیگر کمی کاهش پیدا می‌کند (تقریباً در طول فیدر صاف است).

(c) بهبود ولتاژ گره PV متفاوت از گره PQ است، بهترین محل در ترمینال فیدر خط نیست بلکه در محل میانی است.

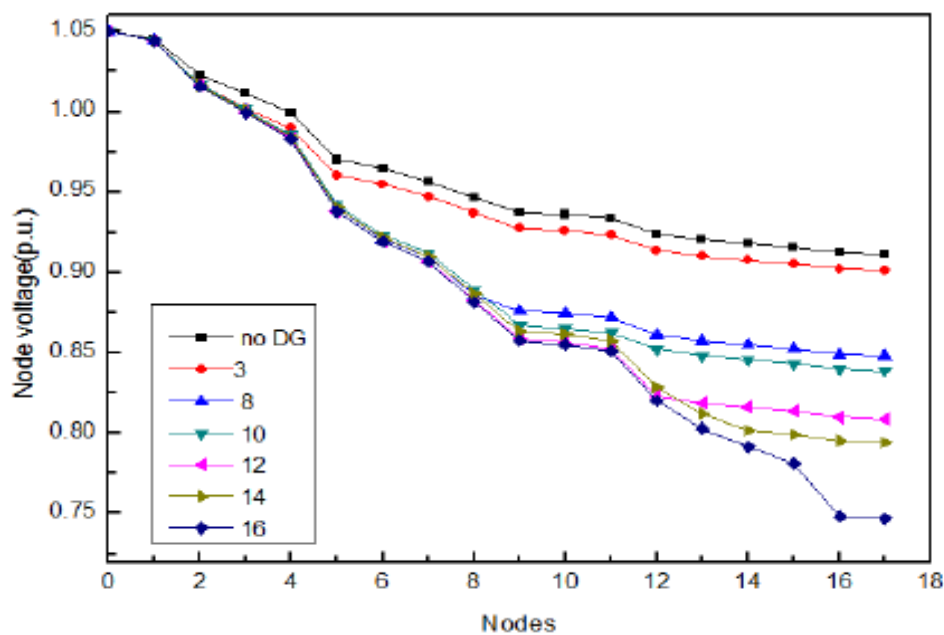
(3) پروفیل ولتاژ گره‌ها وقتی که DG بعنوان گره (V) PQ است

یک DG بعنوان گره (V) PQ به ترتیب به گره‌های 3، 8، 10، 12، 14، 16 معرفی میشود. این DG به شبکه از طریق واسط ژنراتور آسنکرون، متصل میشود. توان اکتیو آن  $P=500\text{kw}$  است و رابطه توان اکتیو و راکتیو آن بصورت زیر است:

$$Q = -\frac{U^2}{x_m} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P^2 x^2}}{2x}$$

پارامترهای آن  $x = 0.195 x_m = 3.8$  است.

شکل 4 مقایسه پروفیل ولتاژ بدون DG و با DG بعنوان گره PQ (V) که به گره‌های مختلف معرفی میشود را نشان میدهد.



شکل 4: DG بعنوان گره PQ (V)

ولتاژ تمامی گره‌ها بعد از معرفی DG بعنوان گره PQ (V) کاهش پیدا می‌کند. دلیل آن ممکن است به این خاطر باشد که DG از سیستم‌های توزیع توان راکتیو جذب می‌کند. زمانیکه DG از گره معرفی شده به گره‌های ترمینال حرکت می‌کند، ولتاژ بتدریج کاهش پیدا می‌کند. با این وجود کاهش مشهود نیست.

#### 4.1.2 تاثیر بر روی تلفات توان اکتیو

جدول 2 مقایسه‌ای از تلفات قبل و بعد از نصب سه نوع DG نشان می‌دهد.

DG type	Active power losses at different locations (kW)					
	No DG	Introduced node				
		8	10	12	14	16
PQ	318.03	207.11	200.83	196.70	197.19	203.03
PV	318.03	191.40	191.22	192.92	196.23	206.93
PQ(V)	318.03	756.35	789.42	935.39	968.37	1049.4

جدول 2: تلفات در محل‌های مختلف

میتوان مشاهده کرد که تلفات با نوع DGها رابطه نزدیکی دارد. برای DGهای بعنوان گره PQ وقتی DG معرفی شده از سمت پست به سمت بارها می‌رود، تلفات در ابتدا کاهش پیدا می‌کند و سپس در طول فیدر بهبود پیدا میکند. باید توجه کرد که مینیمم تلفات در گره‌ای است که تقریباً در وسط فیدر قرار گرفته است (مانند گره 12 در جدول 2). برای DG نوع PV اگر محل قرار گیری آن معقول باشد، تلفات کاهش پیدا می‌کند. مینیمم تلفات در گره‌ای است که در وسط فیدر قرار گرفته باشد (مانند گره 10 در جدول 2). بدلیل جذب توان راکتیو از سیستم‌های توزیع، DGها نوع PQ (V) تلفات را به میزان بسیار زیادی افزایش می‌دهند. علاوه بر این تلفات در زمانیکه گره معرفی شده در طول فیدر باشد، افزایش پیدا می‌کند.

#### 4.2 تاثیر ظرفیت‌های گوناگون DG بر روی پروفیل ولتاژ و تلفات

##### 4.2.1 تاثیر بر روی پروفیل ولتاژ

در این بخش از طریق جایگزین کردن توان اکتیو و راکتیو DG در گره 16، تاثیر بر روی ولتاژ ظرفیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در محاسبات توان خروجی DGهای مدل شده بعنوان گره PQ و گره PQ (V) از  $300+j150$  KVA شروع و هر بار  $50+j100$  KVA افزایش پیدا میکند. توان اکتیو خروجی DGهای بعنوان PV مانند دو نوع DG دیگر است و فرض میکنیم که توان راکتیو اولیه صفر است و ولتاژ آن 10 کیلو ولت است. در جدول 3 خروجی‌ها در 6 مورد برای هر نوع DG داده شده است.

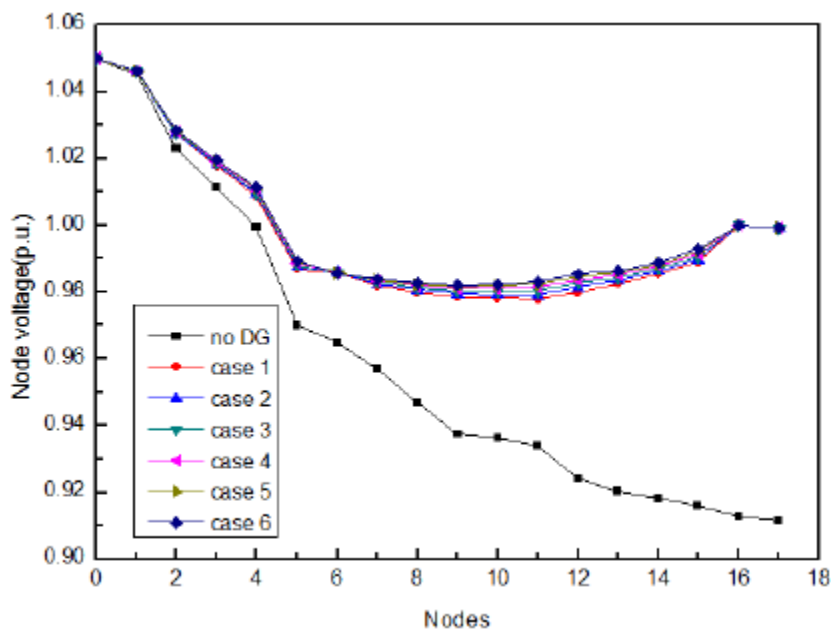


شکل 5: DG بعنوان گره PQ

می‌توان مشاهده کرد که وقتی که ظرفیت DG افزایش پیدا می‌کند، ولتاژ تمام گره‌ها بهبود پیدا می‌کند.

(2) پروفیل ولتاژ گره‌ها هنگامیکه DG بعنوان گره PV به شبکه معرفی می‌شود.

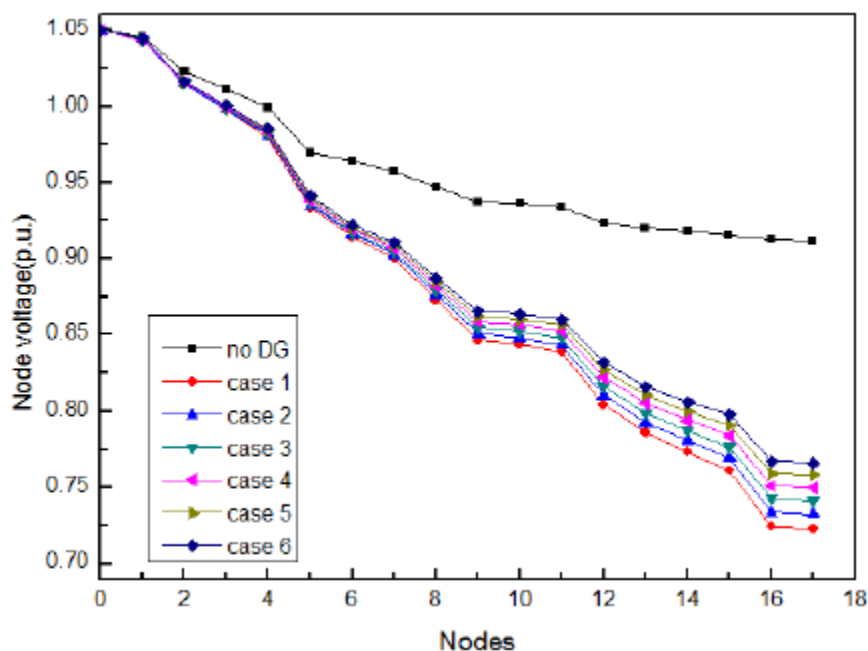
شکل 6 نشان می‌دهد که منحنی ولتاژ و نتایج تقریباً در 6 مورد یکسان است. این امر بخاطر آن است که DG نوع PV نیازمند آن است که ولتاژ گره‌اش در همان مقدار مشخص شده باقی بماند و ولتاژ کاری با ظرفیت ندارد. باید توجه کرد که ممکن است تلفات توان DG مطابق آن تغییر کند.



شکل 6: DG بعنوان گره PV

(3) پروفیل ولتاژ گره‌ها وقتی که DG بعنوان گره PQ (V) معرفی می‌شود

در شکل 7، مشابه DG نوع PQ، ولتاژ گره با افزایش توان خروجی DG افزایش پیدا میکند اما ولتاژ بصورت مشهودی بهبود پیدا می‌کند.



شکل 7: DG بعنوان گره PQ (V)

#### 2.2.4 تاثیر بر روی تلفات توان اکتیو

با توجه به جدول 4 میتوان مشاهده کرد که DG نوع PV بهترین مورد برای کاهش تلفات در بین سه نوع DG است. با افزایش ظرفیت DG نوع PQ، تلفات توان بتدریج کاهش پیدا می‌کند. تغییر توان تلفات را خیلی تغییر نمی‌دهد. برای DG نوع PV، تلفات توان در ابتدا کاهش و سپس افزایش پیدا می‌کند و برای DG نوع PQ (V) تلفات توان در مقایسه با حالت بدون DG به میزان بسیار زیادی افزایش پیدا می‌کند.

Case	Active power losses (kW)		
	PQ	PV	PQ(V)
No DG	318.03	318.03	318.03
Case 1	243.11	227.33	1082.8
Case 2	225.87	213.94	1078.9
Case 3	211.91	206.92	1078.9
Case 4	200.94	205.69	1082.8
Case 5	192.73	209.76	1090.2
Case 6	187.06	218.72	1100.9

جدول 4: تلفات در ظرفیت‌های مختلف

## 5. نتیجه‌گیری

بخاطر تنوع DGها، DGها به سه نوع برای حل پخش توان در این مطالعه تقسیم شدند. الگوریتمی برای ارزیابی تأثیر محل و ظرفیت‌های گوناگون DG بر روی پروفیل ولتاژ و تلفات در سیستم‌های توزیع در این مقاله ارائه شد. نتایج سیستم 33 باسه IEEE از طریق جایگزین کردن محل و ظرفیت سه نوع DG، تایید کردند که روش ارائه شده قابلیت اجرا را دارد. از این نتایج می‌توان بعنوان مرجعی برای برنامه‌ریزی DGها استفاده کرد.

مراجع

- [1]. N. Jenkins, D. Kirschen, G. Strbac, R. Allan, P. Crossley “Embedded generation”, IEE Power and Energy series 31, London, W, 2000,p. 57.
- [2]. R. A. Walling, R. Saint, R. C. Dugan, J. Burke, L. A. Kojovic, “Summary of distributed Resources Impact on Power Delivery Systems” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 23, No. 3, pp. 1636-1644, July 2008.
- [3]. IEEE P1547 *Standard for Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems*, IEEE P1547 Std., Sep. 2002.
- [4]. M. Thomson, “Automatic-Voltage-Control Relays and Embedded Generation Part 1” Inst. Elect. Eng. Power Eng. J., Vol. 14, No. 2, pp. 71-76, April 2000.
- [5]. M. Thomson, “Automatic-Voltage-Control Relays and Embedded Generation Part 2” Inst. Elect. Eng. Power Eng. J., Vol. 14, No. 3, pp. 93-99, June 2000.
- [6]. C. L. Masters, “Voltage rise: The big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines,” *Inst. Elect. Eng. Power Eng. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 5–12, Feb. 2002.
- [7]. S. Repo, H. Laaksonen, P. Jarventausta, “A case study of a voltage rise problem due to a large amount of distributed generation on a weak distribution network,” presented at the 2003 IEEE Bologna Power Tech conference, June 23-26th, Italy.