

## پخش بار بهینه مبتنی بر جایابی بهینه دو سیستم دو ترمیناله HVDC به منظور بهره‌برداری بهینه سیستم قدرت

مهدی ابوالفضل<sup>(۱)</sup> - افشین لشکرآرا<sup>(۲)</sup> - احد کاظمی<sup>(۳)</sup> - سید علی نبوی نیای<sup>(۴)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

(۲) استادیار - دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

(۳) دانشیار - دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(۴) دانشیار - دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تورنتو کانادا

تاریخ پذیرش: بهار ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۹۱

**خلاصه:** در این مقاله مدل‌سازی ریاضی مناسبی از سیستم دو ترمیناله HVDC برای جایابی بهینه و پخش بار بهینه مانند مدل تزریق توان ارائه شده است. برای توسعه پخش بار بهینه (OPF) و جایابی بهینه مبتنی بر OPF از دو سیستم دو ترمیناله HVDC برای کاهش مجموع هزینه سوخت و تلفات اکتیو شبکه به‌عنوان توابع هدف استفاده شده است. چهارچوب بهینه‌سازی به وسیله برنامه‌ریزی غیر خطی (NLP) مدل گردیده است و با استفاده از محیط نرم افزاری Matlab و GAMS حل شده است. الگوریتم پیشنهادی بر روی سیستم‌های آزمایش ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی قابلیت حضور دو سیستم دو ترمیناله HVDC را در بهبود عملکرد سیستم قدرت نشان می‌دهد. علاوه بر این، دو سیستم دو ترمیناله HVDC در عملکرد سیستم قدرت از نظر اقتصادی و فنی با ادوات FACTS: PST و OUPFC مقایسه شده است.

**کلمات کلیدی:** VSC-HVDC، پخش بار بهینه، جایابی بهینه مبتنی بر OPF، مدل‌سازی، برنامه‌ریزی غیر خطی.

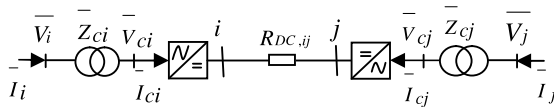
### ۱- مقدمه

مهندسی منوط به معیارهای اقتصادی می‌باشد. ولی مزایای دیگری نیز در احداث یک خط HVDC وجود دارد که می‌تواند تا حدود زیادی بهره‌برداران شبکه‌های قدرت را به سمت استفاده از خطوط HVDC با وجود هزینه بالای سرمایه‌گذاری آن رهنمون سازد [۱]. با توجه به مزایای HVDC که بسیاری از مشکلات سیستم‌های امروزی را کاهش می‌دهد روند کاربرد این تجهیز در سیستم‌های قدرت بسیار افزایش یافته است. حضور بیش از ۱۰۰ خط HVDC در سرتاسر دنیا از جمله آمریکا، ژاپن، کشورهای اسکاندیناوی، استرالیا، برزیل، آفریقای جنوبی، هند و چین نشان دهنده روند رو به رشد به کارگیری تکنولوژی DC در سیستم انتقال می‌باشد [۱]. از این رو، این مقاله در صدد ارائه مناسب‌ترین الگوی بهره‌برداری با حضور سیستم‌های چندترمیناله HVDC می‌باشد. پخش بار بهینه (OPF) یکی از ابزارهای اصلی در مطالعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت می‌باشد. در برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های قدرت، پخش بار بهینه در مراحل متعدد

افزایش تقاضا برای انرژی به توسعه سیستم قدرت الکتریکی و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر منجر گردیده است. اما ساخت خطوط انتقال جدید به‌صرف زمان و هزینه گزاف نیازمند است. به عبارت دیگر منابع انرژی شامل انرژی بادی و خورشیدی معمولاً در مکان‌های دور از مصرف کنندگان وجود دارند و خطوط انتقال AC در مسافت‌های طولانی از لحاظ اقتصادی و فنی مناسب نمی‌باشند. در سال‌های اخیر با توسعه صنعت الکترونیک قدرت، ساخت ادوات نیمه هادی با توان‌های بالاتر و قیمت‌های ارزان‌تر صورت گرفته است. استفاده از سیستم‌های جریان مستقیم ولتاژ بالا<sup>۱</sup> (HVDC) یک راه حل فعال برای ادغام مزارع بادی موجود در دریا (و سایر روش‌های تولید انرژی الکتریکی در دریا) با سایر نیروگاه‌ها در خشکی حتی در حالت سنکرونیزه نبودن و در مسافت‌های طولانی می‌باشد. اگرچه معمولاً انتخاب خط HVDC در شبکه‌های قدرت مانند دیگر طرح‌های

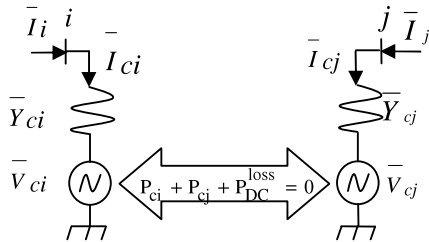
## ۲- مدل سازی سیستم دو ترمیناله HVDC

سیستم دو ترمیناله HVDC شامل دو مبدل منبع ولتاژ می باشد (شکل (۱)). مبدل ها به وسیله ترانسفورماتورها به شین های  $i$  و  $j$  متصل می گردند. مدار معادل سیستم دو ترمیناله HVDC شامل ترکیب سری منبع ولتاژ و امپدانس ترانسفورماتور می باشد که در آن مبدل منبع ولتاژ (VSC) به وسیله مدل منبع ولتاژ نشان داده شده است و امپدانس ترانسفورماتور به وسیله  $\bar{Z}_{cm}$  ( $m=i,j$ ) نشان داده می شود (شکل (۲)). دو کنورتور با توجه به کاربردشان به صورت پشت به پشت یا توسط کابل DC به هم متصل می گردند [۷]، [۱۲].



شکل (۱): نمایش تک خطی سیستم دو ترمیناله HVDC [۱۲]

Fig. (1): Single-line schematic of a two terminal HVDC system [12]



شکل (۲): مدار معادل سیستم دو ترمیناله HVDC [۱۲]

Fig. (2): Equivalent circuit for two terminal HVDC system [12]

جریان عبوری از کنورتور و امپدانس سری به صورت زیر می باشد:

$$\bar{I}_{cm} = \bar{I}_m = \bar{Y}_{cm} \times (\bar{V}_m - \bar{V}_{cm}) \quad , m=i,j \quad (1)$$

که در آن،

$$\bar{V}_m : \text{فازور ولتاژ شین } m \text{ ام } (m=i,j),$$

$\bar{V}_{cm}$  : فازور ولتاژ ac در سمت مبدل متصل شده در گره  $m$  ام،

$$\bar{Z}_{cm} : \text{امپدانس ترانسفورماتور } (m=i,j) \left( \bar{Y}_{cm} = \frac{1}{\bar{Z}_{cm}} = G_{cm} + jB_{cm} \right)$$

توان مختلط تزریقی  $S_{cm}$  ( $m=i,j$ ) توسط مبدل به شین های  $m=i,j$  به صورت زیر بیان می شوند:

$$\bar{S}_{cm} = -\bar{V}_{cm} \bar{I}_{cm}^* = P_{cm} + jQ_{cm} \quad , (m = i, j) \quad (2)$$

$$P_{cm} = \text{Real}(\bar{S}_{cm}) = G_{cm} V_{cm}^2 - V_m V_{cm} \cdot [G_{cm} \cos(d_{cm} - q_m) + B_{cm} \sin(d_{cm} - q_m)] \quad (3)$$

$$Q_{cm} = \text{Image}(\bar{S}_{cm}) = -B_{cm} V_{cm}^2 - V_m V_{cm} \cdot [G_{cm} \sin(d_{cm} - q_m) - B_{cm} \cos(d_{cm} - q_m)] \quad (4)$$

که در آن،

$$(22)$$

برنامه ریزی به عنوان ابزاری برای تکمیل طراحی و همچنین ارزیابی گزینه های توسعه مختلف به دست آمده از مطالعات برنامه ریزی مورد استفاده قرار می گیرند. مسئله پخش بار بهینه ابتدا در اوایل دهه ۱۹۶۰ توسط Carpentier مطرح و توسط Tinney و Dommel به تفصیل معرفی گردید [۲]، [۳].

بیشتر تحقیقات پیشین روی سیستم های HVDC مبتنی بر VSC<sup>2</sup> به مطالعه پخش بار متمرکز شده است، که عبارتند از: تجزیه و تحلیل پخش بار شبکه HVDC پنج ترمیناله با استفاده از روش تکرار عددی بر اساس تقریب نیوتن-رافسون [۴]، پیشنهاد دو مدل مناسب VSC-HVDC چند ترمیناله برای مطالعه پخش بار با استفاده از الگوریتم نیوتن رافسون [۵]، پخش بار VSC-HVDC چند ترمیناله با استفاده از الگوریتم پخش بار AC/DC ترتیبی توسط نرم افزارهای Matlab و Matpower [۶]، [۷]، پخش بار سیستم MTDC با استفاده از روش ریاضی توسط نرم افزار Matlab [۸]، [۹] و مدل پخش بار سیستم انتقال VSC-HVDC با استفاده از الگوریتم نیوتن-رافسون [۱۰]، [۱۱] اخیراً مسئله پخش بار بهینه (OPF) در سیستم های HVDC مورد توجه قرار گرفته است که عبارتند از: پخش بار بهینه VSC-HVDC برای کاهش هزینه سوخت ژنراتورها به عنوان تابع هدف با استفاده از الگوریتم نیوتن [۱۲]، پخش بار بهینه AC-DC با استفاده از الگوریتم ژنتیک [۱۳]، مسئله پخش بار بهینه با استفاده از روش برنامه ریزی درجه دوم ترتیبی (SQP) برای سیستم قدرت AC-DC با سیستم های DC یک یا چند ترمیناله [۱۴].

تاکنون در تحقیقات انجام شده بر روی سیستم های HVDC به زمینه جایابی بهینه مبتنی بر OPF کنورتورهای سیستم های HVDC توجه ویژه ای نشده است. بنابراین در این مقاله به پخش بار بهینه و جایابی بهینه مبتنی بر OPF در حضور دو سیستم دو ترمیناله HVDC در سیستم های قدرت می پردازیم. دلیل اول حضور دو سیستم HVDC قطعاً بهبود توابع هدف و دلیل دوم و پر اهمیت تر وجود خطوط پربار زیاد در شبکه بوده و به دنبال کاهش پرباری پربارترین خطوط و توازن توان بهتری در کلیه خطوط بوده ایم. برای مدل سازی ریاضی سیستم HVDC از تکنیک مدل تزریق توان استفاده شده است. راه حل پیشنهادی با استفاده از روش برنامه ریزی غیر خطی (NLP) و با استفاده از محیط نرم افزاری Matlab و GAMS<sup>3</sup> حل شده است. الگوریتم پیشنهادی برای سیستم های آزمایش ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE در حضور دو سیستم دو ترمیناله HVDC به شکلی است که ضمن حداقل ساختن هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه، رعایت مجموعه ای از محدودیت ها را برای شبکه فراهم نماید.

این مقاله شامل این بخش ها می باشد: بخش (۲)، مدل سازی سیستم دو ترمیناله HVDC. بخش (۳)، فرمول بندی مسئله. در بخش (۴)، مطالعه موردی و در نهایت بخش (۵) به نتیجه گیری اختصاص یافته است.

ترانسفورماتورها می‌باشد.  $f(x,u)$  تابع هدف است که می‌تواند هزینه تولید کل، تلفات کل شبکه باشد.  $g(x,u)$  قیود تساوی که معمولاً قیود پخش بار می‌باشد و  $h(x,u)$  قیود نامساوی که محدودیت‌های متغیرهای کنترل و محدودیت‌های بهره‌برداری سیستم قدرت می‌باشد. در ادامه به معرفی توابع هدف، قیود مساوی و نامساوی و قیود سیستم‌های HVDC خواهیم پرداخت.

### ۱-۳-۱- توابع هدف

همانطور که گفته شد برای تأثیر حضور دو سیستم دو ترمیناله HVDC بر نتایج پخش بار بهینه و جایابی بهینه مبتنی بر OPF از دو تابع هدف استفاده شده است این دو تابع هدف عبارتند از: هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه. در ادامه روابط مربوط به توابع هدف تشریح شده است.

### ۱-۱-۳- تابع هزینه سوخت ژنراتورها

اولین تابع هدف حداقل نمودن هزینه سوخت ژنراتورها می‌باشد که رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]، [۱۸] و [۱۹].

$$F_1 = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2), (\$/h) \quad (12)$$

که در آن،

NG: تعداد ژنراتورها،

$P_{Gi}$ : توان اکتیو خروجی ژنراتور  $i$  ام بر حسب MW،

$a_i$ ،  $b_i$ ،  $c_i$ : ضرایب هزینه سوخت ژنراتور  $i$  ام می‌باشد.

### ۱-۳-۲- تابع تلفات اکتیو شبکه

دومین تابع هدف حداقل نمودن مجموع تلفات شبکه با رابطه زیر می‌باشد [۲۰]، [۲۱]:

$$F_2 = P_{\text{loss}}(x, u) = \sum_{k=1}^{NI} g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)]$$

که در آن،

$g_k$ : کاندوکتانس خط  $k$  ام بین شین  $i$  و  $j$ ،

$V_i$  و  $V_j$ : به ترتیب دامنه ولتاژ در شین  $i$  و  $j$ ،

$\theta_i$  و  $\theta_j$ : زاویه ولتاژ در شین  $i$  و  $j$ ، و NI تعداد خطوط می‌باشد.

### ۱-۳-۲- قیود مساوی و نامساوی

به طور کلی مساله OPF و جایابی بهینه مبتنی بر OPF شامل دو مجموعه قیود مساوی و نامساوی می‌باشد که به ترتیب با روابط (۱۰) و (۱۱) بیان گردید [۱۵]، [۱۶]. در این بخش قیود مساوی و نامساوی تشریح می‌گردند.

### ۱-۲-۳- قیود مساوی

قیود مساوی معادلات پخش بار برای توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌شوند [۱۶]، [۲۰] و [۲۱]:

$V_m, \theta_m$ : به ترتیب اندازه و زاویه ولتاژ شین  $m$  ام ( $m=i,j$ )،  
 $V_{cm}, \delta_{cm}$ : به ترتیب اندازه و زاویه ولتاژ ac در سمت مبدا متصل شده در گره  $m$  ام،

$\bar{S}_{cm}, P_{cm}, Q_{cm}$ : به ترتیب توان‌های مختلط، اکتیو و راکتیو تزریقی توسط مبدا به شین  $m$  ام می‌باشد.

توان مختلط تزریقی  $S_{cm}(m=i,j)$  به شین‌های  $m=i,j$  به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\bar{S}_m = -\bar{V}_m \bar{I}_m^* = P_m + jQ_m, (m = i, j) \quad (5)$$

$$P_m = \text{Re}al(\bar{S}_m) = -G_{cm} V_m^2 + V_m V_{cm} [G_{cm} \cos(q_m - d_{cm}) + B_{cm} \sin(q_m - d_{cm})] \quad (6)$$

$$Q_m = \text{Image}(\bar{S}_m) = -B_{cm} V_m^2 + V_m V_{cm} [B_{cm} \cos(\theta_m - \delta_{cm}) + G_{cm} \sin(\theta_m - \delta_{cm})] \quad (7)$$

که در آن،

$P_m, Q_m$ : توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شین  $m$  ام می‌باشد.

توان اکتیو عبوری از کنورترها در طول اتصال DC ( $R_{DC} > 0$ )، همواره باید شرط زیر را برآورده نماید:

$$\text{Real}\{\bar{V}_{ci} \bar{I}_{ci}^* + \bar{V}_{cj} \bar{I}_{cj}^*\} + P_{DC}^{\text{loss}} = 0 \quad (8)$$

که در آن،  $P_{DC}^{\text{loss}}$  تلفات بخش DC می‌باشد.

و برای اتصال به صورت پشت به پشت کنورترهای سیستم HVDC ( $R_{DC} = 0$ )،  $P_{DC}^{\text{loss}}$  صفر در نظر گرفته خواهد شد.

### ۳- فرمول بندی مسئله

جایابی بهینه مبتنی بر OPF و پخش بار بهینه (OPF) در واقع یک فرآیند تکراری است که با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی، درصد یافتن مناسب‌ترین الگوی بهره‌برداری از سیستم است که ضمن رعایت همه‌ی قیود بهره‌برداری، برخی معیارها که در تابع هدف مسئله تبلور یافته‌اند را بهینه سازد.

رابطه ریاضی مسئله OPF به صورت زیر می‌باشد [۱۵]، [۱۶]:

$$\text{Min/max } f(x,u) \quad (9)$$

با توجه به اینکه،

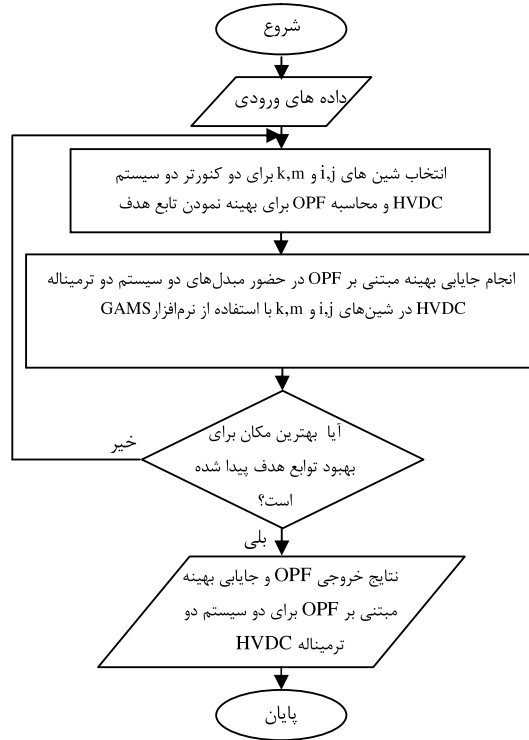
$$g(x,u) = 0 \quad (10)$$

$$h(x,u) \leq 0 \quad (11)$$

که  $x$  متغیرهای وابسته (یا حالت) شامل توان اکتیو و راکتیو شین اصلی، زاویه ولتاژ و توان راکتیو شین‌های ژنراتوری و دامنه و زاویه شین‌های بار می‌باشد.  $u$  متغیرهای کنترل شامل توان اکتیو و دامنه ولتاژ شین‌های ژنراتوری، دامنه و زاویه ولتاژ شین اصلی و موقعیت تپ

### ۳-۳- بیان مسئله

اصولاً مسائل OPF و جایابی بهینه کنورترهای دو سیستم دو ترمیناله HVDC مبتنی بر OPF یک مقدار با هم متفاوت می‌باشد. در مسأله OPF، محل تجهیزات شبکه، حدود مجاز تولید ژنراتورها، حدود مجاز تغییرات دامنه ولتاژ شین‌ها، حداکثر میزان بارگذاری خطوط و سایر محدودیت‌های سیستم و تجهیزات آن مشخص است. لذا سعی بر این است که با وجود این محدودیت‌ها، شرایط بهره‌برداری از آنها برای رسیدن به بهترین حالت یک تابع هدف به دست آید. ولی در مسأله جایابی بهینه، یک سری تجهیزات در حالت کلی مسأله، از لحاظ مکان قرارگیری، ظرفیت و تعداد نامعلوم می‌باشد و سعی بر این است که وضعیت تجهیزات جایابی شونده، جهت رسیدن به بهترین وضعیت یک تابع هدف به دست آید. این مسأله در دل خود یک مسأله پخش بار بهینه دارد. در واقع در مسائل جایابی ابتدا یک محل برای تجهیز جایابی شونده مشخص می‌شود، سپس برای آن حالت یک پخش بار بهینه حل شده و با استفاده از آن مقدار تابع هدف محاسبه می‌گردد. این کار آن-قدر تکرار می‌شود تا شرایط توقف الگوریتم جایابی محقق شود. پس از اینکه جایابی بهینه انجام شد. در این مرحله پخش بار بهینه با در نظر گرفتن جایگاه ثابت شده برای کنورترهای دو سیستم دو ترمیناله HVDC انجام خواهد شد و مقدار بهینه شده تابع هدف مشخص می‌گردد. روند نمای الگوریتم پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): روندنمای الگوریتم پیشنهادی

Fig. (3): Flowchart of the proposed algorithm

$$P_{Gi} + P_{ci} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{Nb} V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] = 0 \quad (14)$$

$$Q_{Gi} + Q_{ci} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^{Nb} V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] = 0 \quad (15)$$

$$P_{ci} + P_{cj} + P_{DC}^{loss} = 0 \quad (16)$$

که در آن،

$P_{Gi}$  و  $Q_{Gi}$ : به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور  $i$  ام،  $P_{Li}$  و  $Q_{Li}$ : به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو بار در شین  $i$  ام،  $G_{ij}$  و  $B_{ij}$ : به ترتیب کاندوکتانس و سوسپتانس انتقالی بین شین  $i$  ام و  $j$  ام،  $P_{ci}$  و  $Q_{ci}$ : به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو در سمت ac مبدل  $i$  ام و  $Nb$ : تعداد شین‌ها می‌باشد.

### ۳-۲-۲- قیود نامساوی

قیود نامساوی شامل قیود تولید، امنیت و قیود VSC-HVDC می‌باشد که در زیر شرح داده می‌شوند [۱۲]، [۱۷] و [۲۱]:

### ۳-۲-۲-۱- قیود تولید

شامل محدودیت‌های روی ولتاژ و توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتورهاست.

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max}, i=1, \dots, NG \quad (17)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, i=1, \dots, NG \quad (18)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, i=1, \dots, NG \quad (19)$$

که در آن،  $NG$  تعداد شین‌های ژنراتورهاست.

### ۳-۲-۲-۲- قیود امنیت

شامل محدودیت‌های روی ولتاژ شین‌های بار و بارگذاری خطوط انتقال می‌باشد.

$$V_{Li}^{min} \leq V_{Li} \leq V_{Li}^{max}, i=1, \dots, Nd \quad (20)$$

$$S_{Li} \leq S_{Li}^{max}, i=1, \dots, Nl \quad (21)$$

که در آن،  $Nd$  و  $Nl$  به ترتیب شین‌های بار و خطوط انتقال است.

### ۳-۲-۲-۳- قیود VSC-HVDC

این قیود شامل محدودیت‌های روی توان و تنظیمات VSC-HVDC می‌باشد.

$$S_{VSC,i} \leq S_{VSC,i}^{max}, i=1, \dots, Nc \quad (22)$$

$$0 \leq V_{ci} \leq V_{ci}^{max}, i=1, \dots, Nc \quad (23)$$

$$0 \leq \delta_{ci} \leq 2\pi, i=1, \dots, Nc \quad (24)$$

که در آن،  $Nc$  تعداد مبدل‌هاست.

#### ۴- مطالعه موردی

با حضور دو سیستم HVDC نشان داده شده است. مشخصه همگرایی سیستم ۱۴ شینه IEEE برای توابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.

#### ۴-۲- سیستم آزمون ۳۰ شینه IEEE

سیستم آزمون ۳۰ شینه IEEE، شامل ۶ ژنراتور(شینه‌های ۱، ۲، ۵، ۸، ۱۱ و ۱۳ که شین ۱ به‌عنوان شین مبناست) و ۴۱ خط می‌باشد. اثراتی از حضور دو سیستم دو ترمیناله HVDC به منظور بهره‌برداری بهینه برای سیستم آزمایش ۳۰ شینه IEEE بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی قابلیت حضور دو سیستم دو ترمیناله HVDC در عملکرد سیستم قدرت از نظر اقتصادی و فنی با PST و OUPFC در جدول (۵) شرح داده شده است. هدف از این مقایسه، مقایسه بین کنترل کننده‌های پخش توان AC و DC در عملکرد بهینه سیستم‌های قدرت بوده است. در جدول (۶) تلفات خطوط برای قبل از حضور HVDC و با حضور دو سیستم HVDC نشان داده شده است. مشخصه همگرایی سیستم ۳۰ شینه IEEE برای توابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

روش پیشنهادی برای پخش بار بهینه مبتنی بر جایابی بهینه برای کاهش هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات اکتیو برای شبکه‌های استاندارد ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE مورد بررسی قرار گرفته است. روش بهینه‌سازی عددی با استفاده از محیط نرم‌افزاری Matlab و GAMS حل شده است. اطلاعات شبکه مورد آزمایش IEEE را می‌توان در مرجع [۲۲] پیدا کرد.

#### ۴-۱- سیستم آزمون ۱۴ شینه IEEE

سیستم آزمون ۱۴ شینه IEEE، شامل ۵ ژنراتور(شینه‌های ۱، ۲، ۳، ۶ و ۸ که شین ۱ به‌عنوان شین مبناست) و ۲۰ خط می‌باشد. حضور همزمان دو سیستم دو ترمیناله HVDC بر روی سیستم آزمایش ۱۴ شینه IEEE مطالعه شده است. نتایج شبیه‌سازی دو سیستم دو ترمیناله HVDC از لحاظ اقتصادی و فنی با PST<sup>۳</sup> و OUPFC<sup>۴</sup> بر روی سیستم آزمایش ۱۴ شینه IEEE در جدول (۱) به ترتیب برای هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه به عنوان توابع هدف نشان داده شده است. هدف از این مقایسه، مقایسه بین کنترل کننده‌های پخش توان AC و DC در عملکرد بهینه سیستم‌های قدرت بوده است. در جدول (۲) تلفات خطوط برای قبل از حضور HVDC و

Table (1): Results of optimization for the IEEE 14-bus network

جدول (۱): نتایج بهینه‌سازی برای شبکه ۱۴ شینه IEEE

وضعیت	پارامتر	بدون جبرانسانز	PST [۱۷]	OUPFC [۲۱]	با دو سیستم HVDC
F <sub>1</sub>	حداقل هزینه سوخت (\$/h)	17278.80	17270.35	17254.2	17204.91
	مجموع تلفات اکتیو (MW)	1.7128	1.5987	1.384	0.7196
	مجموع تلفات راکتیو (MVAR)	14.2818	12.1315	13.551	10.49997
	محل نصب	-	خط ۵-۱	خط ۲-۱	شین‌های ۱ و ۲ و شین‌های ۱ و ۴
	زمان اجرا (ثانیه)	0.2020	2.8026	-	92.6131
F <sub>2</sub>	حداقل مجموع هزینه تلفات اکتیو شبکه (MW)	1.1280	1.0850	1.020	0.5442
	هزینه سوخت (\$/h)	18186.62	18153.08	-	17534.04
	مجموع تلفات راکتیو (MVAR)	12.2680	12.202	12.017	11.4199
	محل نصب	-	خط ۵-۲	خط ۱۳-۶	شین‌های ۱ و ۲ و شین‌های ۱ و ۱۴
	زمان اجرا (ثانیه)	0.1987	2.7353	-	93.2482

Table (2): Overload lines losses for the IEEE 14-bus network

جدول (۲): تلفات پربارترین خطوط برای شبکه ۱۴ شینه IEEE

تلفات (MW):							
خط ۱	خط ۲	خط ۳	خط ۴	خط ۵	خط ۱۳	خط ۱۵	خط ۱۷
F <sub>1</sub>	بدون HVDC	42.6406	23.1485	21.1342	19.6235	15.0635	10.9011
	با دو سیستم HVDC	2.2103	2.8369	12.0711	0.3049	3.0666	11.8632
F <sub>2</sub>	بدون HVDC	12.1130	9.8870	18.0185	13.2697	8.6106	7.3491
	با دو سیستم HVDC	-0.0028	3.8999	15.7992	8.7515	5.0931	-6.1201

Table (3): Buses voltage that converters are connected (before and after installing converters) to the IEEE 14-bus network  
جدول (۳): ولتاژ شین‌هایی که مبدل‌ها به آنها متصل شده‌اند (قبل و بعد از نصب مبدل‌ها) برای شبکه ۱۴ شینه IEEE

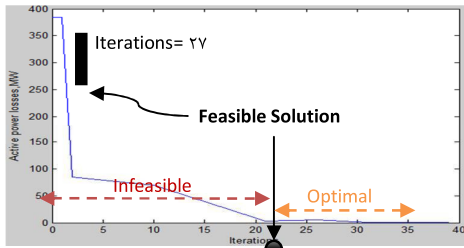
برای تابع هدف اول (هزینه سوخت ژنراتورها)				
بعد از نصب مبدل‌ها		قبل از نصب مبدل‌ها		شماره شین
ولتاژ شین (p.u.)	فاز شین (degree)	ولتاژ شین (p.u.)	فاز شین (degree)	
1.043	0	1.055	0	1
1.043	0.004	1.047	-1.304	2
1.043	-0.107	1.031	-3.043	4
برای تابع هدف دوم (تلفات اکتیو شبکه)				
بعد از نصب مبدل‌ها		قبل از نصب مبدل‌ها		شماره شین
ولتاژ شین (p.u.)	فاز شین (degree)	ولتاژ شین (p.u.)	فاز شین (degree)	
1.027	0	1.035	0	1
1.027	0.002	1.032	-0.367	2
1.058	1.162	1.022	-2.347	14

Table (4): Parameters values of HVDC after the optimization and selection of the optimum point for IEEE 14-bus network  
جدول (۴): مقادیر پارامترهای HVDC پس از بهینه‌سازی و انتخاب نقطه بهینه برای شبکه ۱۴ شینه IEEE

برای تابع هدف اول (هزینه سوخت ژنراتورها)						
HVDC-2			شماره اندیس (m)	HVDC-1		شماره اندیس (m)
زاویه ولتاژ روی مبدل‌ها ( $\delta_{cm}$ ) (degree)	ولتاژ روی کنورتر ( $V_{cm}$ ) (p.u.)	ولتاژ روی کنورتر ( $V_{cm}$ ) (p.u.)		زاویه ولتاژ روی مبدل‌ها ( $\delta_{cm}$ ) (degree)	ولتاژ روی کنورتر ( $V_{cm}$ ) (p.u.)	
0.0094	1.026	1.026	1	1.026	1.0432	1
1.1426	1.0587	1.0587	4	1.0587	1.0428	2
برای تابع هدف دوم (تلفات اکتیو شبکه)						
0.0094	1.0260	1.0266	1	0.0057	1.0266	1
1.1426	1.0587	1.0262	14	-0.0057	1.0262	2

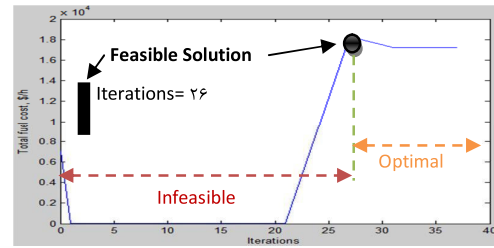
(۱) مشاهده می‌شود حضور دو سیستم HVDC نسبت به PST و OUPFC در عملکرد بهینه سیستم قدرت مؤثرتر خواهد بود. از نتایج جدول (۲) در می‌یابیم که حضور دو سیستم HVDC از پرباری پربارترین خطوط کاسته و توزیع توان رضایت‌بخش‌تری را در کلیه خطوط به همراه داشته است. در جدول (۳) و (۴) به ترتیب ولتاژ شین‌هایی که مبدل‌ها به آنها متصل شده‌اند (قبل و بعد از نصب مبدل‌ها) و مقادیر پارامترهای HVDC پس از بهینه‌سازی و انتخاب نقطه بهینه، نشان داده شده است. مشخصات همگرایی سیستم ۱۴ شینه IEEE برای توابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. (نقطه Feasible Solution جواب ممکن (یا جواب شدنی) را پس از یک سری تکرار به ما می‌دهد، جواب‌ها تا قبل تکراری که جواب ما ممکن می‌باشد، جواب‌هایی غیرممکن (Infeasible) بوده و جواب‌های به‌دست آمده پس از نقطه Feasible به عنوان پاسخ‌های بهینه (Optimal) به حساب می‌آیند و به سمت نقطه بهینه نهایی همگرا می‌شود).

از اطلاعات جدول (۲) می‌توان نتیجه گرفت که تلفات خطوط در حضور سیستم‌های HVDC به دلیل توزیع مناسب توان در خطوط انتقال نسبت به حالت بدون نصب HVDC کاهش یافته و در نتیجه آن، کاهش مجموع تلفات توان اکتیو (به‌عنوان تابع هدف دوم) را خواهیم داشت و می‌توان نتیجه گرفت با کاهش تلفات خطوط انتقال، تولید توان اکتیو ژنراتورها کاهش یافته و طبق رابطه (۱۲) موجب کاهش مجموع هزینه سوخت ژنراتورها (به‌عنوان تابع هدف دوم) می‌شود. با این توضیحات، با توجه به نتایج شبیه‌سازی در جدول (۱) در می‌یابیم که حضور اتصال دو سیستم HVDC باعث کاهش هزینه سوخت ژنراتورها و کاهش تلفات شبکه خواهد شد. در حالت اتصال دو سیستم HVDC در بهینه‌سازی هزینه سوخت ژنراتورها به عنوان تابع هدف اول، هزینه سوخت ۰/۴۲ درصد، تلفات اکتیو شبکه ۵۸ درصد و تلفات توان راکتیو شبکه ۲۶ درصد نسبت به وضعیت بدون جبران‌ساز کاهش یافته است. برای تابع هدف دوم نیز تلفات اکتیو شبکه ۵۱/۷ درصد، هزینه سوخت ۳/۵۸ درصد و تلفات توان راکتیو شبکه ۶/۹ درصد نسبت به وضعیت بدون جبران‌ساز کاهش یافته است. در هر دو حالت بهینه‌سازی توابع هدف مشاهده می‌نمائیم که تلفات توان اکتیو و راکتیو به خوبی کاهش یافته است و همان‌طور که از نتایج جدول



شکل (۵): مشخصه همگرایی برای سیستم ۱۴ شینه IEEE برای تلفات توان اکتیو

Fig. (5): Convergence characteristic of IEEE 14-bus system for active power losses



شکل (۴): مشخصه همگرایی برای سیستم ۱۴ شینه IEEE برای هزینه سوخت ژنراتورها

Fig. (4): Convergence characteristic of IEEE 14-bus system for fuel cost of generators

Table (5): Results of optimization for the IEEE 30-bus network

جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی برای شبکه ۳۰ شینه IEEE

وضعیت	پارامتر	بدون جبران‌ساز	PST [۲۱]	OUPFC [۲۱]	با دو سیستم HVDC
F <sub>1</sub>	حداقل هزینه سوخت (\$/h)	802.25	802.229	800.852	778.73
	مجموع تلفات اکتیو (MW)	9.4471	9.441	9.144	3.2429
	مجموع تلفات راکتیو (MVAR)	37.7895	38.428	37.231	16.0288
	محل نصب	-	-	خط ۴-۶	شین‌های ۲ و ۳ و شین‌های ۴ و ۵
	زمان اجرا (ثانیه)	1.1148	-	-	103.561
F <sub>2</sub>	حداقل مجموع هزینه تلفات اکتیو شبکه (MW)	3.2907	3.286	3.090	1.8372
	هزینه سوخت (\$/h)	968.12	-	-	835.69
	مجموع تلفات راکتیو (MVAR)	16.2458	17.356	16.500	11.0590
	محل نصب	-	-	خط ۶-۷	شین‌های ۲ و ۳ و شین‌های ۴ و ۵
	زمان اجرا (ثانیه)	0.895	-	-	104.248

Table (6): Overload lines losses for the IEEE 30-bus network

جدول (۶): تلفات پربارترین خطوط برای شبکه ۳۰ شینه IEEE

تلفات (MW)	خط ۱	خط ۲	خط ۳	خط ۴	خط ۵	خط ۶	خط ۷	خط ۹	خط ۱۴	خط ۱۵	خط ۱۸	
F <sub>1</sub>	بدون HVDC	114.70	61.62	32.665	57.65	63.037	43.83	48.93	34.61	30.62	30.56	18.22
	با دو سیستم HVDC	15.592	7.508	3.105	5.082	41.738	-3.316	-26.70	56.706	32.368	25.429	15.783
F <sub>2</sub>	بدون HVDC	26.572	25.12	19.93	22.45	39.42	25.40	24.44	۲۸/۴۹	32.86	9.36	20.55
	با دو سیستم HVDC	0.757	12.632	13.997	10.157	1.112	15.491	7.358	0.811	33.415	8.447	20.154

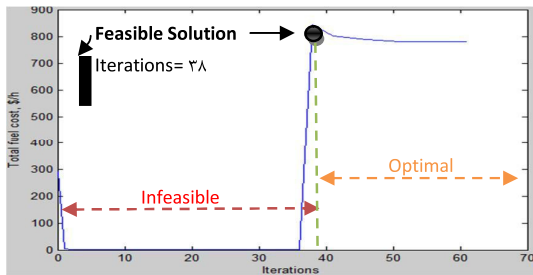
Table (7): Buses voltage that converters are connected (before and after installing converters) to the IEEE 30-bus network

جدول (۷): ولتاژ شین‌هایی که میدل‌ها به آنها متصل شده‌اند (قبل و بعد از نصب میدل) برای شبکه ۳۰ شینه IEEE

برای تابع هدف اول (هزینه سوخت ژنراتورها)				
قبل از نصب میدل‌ها		بعد از نصب میدل‌ها		شماره شین
ولتاژ شین (p.u.)	زاویه شین (degree)	ولتاژ شین (p.u.)	زاویه شین (degree)	
1.060	0	1.052	0	1
1.042	-3.445	1.052	0.041	2
1.017	-7.560	1.052	-0.195	6
برای تابع هدف دوم (تلفات اکتیو شبکه)				
قبل از نصب میدل‌ها		بعد از نصب میدل‌ها		شماره شین
ولتاژ شین (p.u.)	زاویه شین (degree)	ولتاژ شین (p.u.)	زاویه شین (degree)	
1.060	0	1.046	0	1
1.056	-0.791	1.046	-0.025	2
1.036	-4.825	1.046	-0.146	5

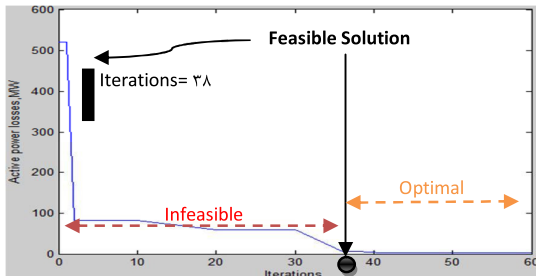
Table (8): Parameters values of HVDC after the optimization and selection of the optimum point for IEEE 30-bus network  
جدول (۸): مقادیر پارامترهای HVDC پس از بهینه‌سازی و انتخاب نقطه بهینه برای شبکه ۳۰ شینه IEEE

برای تابع هدف اول (هزینه سوخت ژنراتورها)						
HVDC-2			شماره	HVDC-1		
ولتاژ روی کنتورتر ( $V_{Cm}$ )	زاویه ولتاژ روی مبدل‌ها ( $\delta_{Cm}$ ) (degree)	انديس (m)		ولتاژ روی کنتورتر ( $V_{Cm}$ )	زاویه ولتاژ روی مبدل‌ها ( $\delta_{Cm}$ ) (degree)	انديس (m)
1.0480	0.0118	1		1.0615	0.0052	1
1.0480	-0.1882	6		1.0523	0.0367	2
برای تابع هدف دوم (تلفات اکتیو شبکه)						
1.0480	0.0118	1		1.0644	0.1048	1
1.0480	-0.1882	5		1.0454	-0.0274	2



شکل (۶): مشخصه همگرایی برای سیستم ۳۰ شینه IEEE برای هزینه سوخت ژنراتورها

Fig. (6): Convergence characteristic of IEEE 30-bus system for fuel cost of generators



شکل (۷): مشخصه همگرایی برای سیستم ۳۰ شینه IEEE برای تلفات توان اکتیو

Fig. (7): Convergence characteristic of IEEE 30-bus system for active power losses

### ۵- نتیجه گیری

سیستم انتقال VSC-HVDC ترکیبی از جدیدترین فناوری‌ها در زمینه نیمه‌هادی، کنترل و کابل‌های انتقال توان است. با استفاده از این سیستم می‌توان کیفیت توان را در سیستم‌های انتقال بهبود بخشید. استفاده از سیستم‌های HVDC یک راه حل فعال برای ادغام مزارع بادی موجود در دریا (و سایر روش‌های تولید انرژی الکتریکی در دریا) با سایر نیروگاه‌ها در خشکی حتی در حالت سنکرونیزه نبودن و در مسافت‌های طولانی می‌باشد. از اینرو در این مقاله مناسب‌ترین الگوی بهره‌برداری با حضور دو سیستم دو ترمیناله HVDC بررسی شده است. در این مقاله، سیستم دو ترمیناله HVDC معرفی می‌شود که برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه سیستم قدرت استفاده شده است. مدل

به‌طور مشابه، از اطلاعات جدول (۶) می‌توان نتیجه گرفت که تلفات خطوط در حضور سیستم‌های HVDC به دلیل توزیع مناسب توان در خطوط انتقال نسبت به حالت بدون نصب HVDC کاهش یافته و در نتیجه آن، کاهش مجموع تلفات توان اکتیو را خواهیم داشت (به‌عنوان تابع هدف دوم) و می‌توان نتیجه گرفت با کاهش تلفات خطوط انتقال، تولید توان اکتیو ژنراتورها کاهش یافته و طبق رابطه (۱۲) موجب کاهش مجموع هزینه سوخت ژنراتورها (به‌عنوان تابع هدف دوم) می‌شود. با این توضیحات، نتایج شبیه‌سازی در جدول (۳) نشان می‌دهد که حضور اتصال دو سیستم HVDC در شبکه ۳۰ شینه IEEE نیز باعث کاهش هزینه سوخت ژنراتورها و کاهش تلفات شبکه خواهد شد. در حالت اتصال دو سیستم HVDC در بهینه‌سازی هزینه سوخت ژنراتورها به عنوان تابع هدف اول، هزینه سوخت ۲/۹۳ درصد، تلفات اکتیو شبکه ۶۵/۶۷ درصد و تلفات توان راکتیو شبکه ۵۷/۵۸ درصد نسبت به وضعیت بدون جبران‌ساز کاهش یافته است. در بهینه‌سازی تلفات توان اکتیو شبکه به عنوان تابع هدف دوم نیز تلفات اکتیو شبکه ۴۴/۱۷ درصد، هزینه سوخت ۱۳/۶۸ درصد و تلفات توان راکتیو شبکه ۳۱/۹۲۷ درصد نسبت به وضعیت بدون جبران‌ساز کاهش یافته است. در هر دو حالت بهینه‌سازی توابع هدف مشاهده می‌نماییم که تلفات توان اکتیو و راکتیو به‌خوبی کاهش یافته است و همانطور که از نتایج جدول (۳) مشاهده می‌شود حضور دو سیستم HVDC در شبکه ۳۰ شینه IEEE نیز نسبت به PST و OUPFC در عملکرد بهینه سیستم قدرت مؤثرتر خواهد بود. به‌طور مشابه، از نتایج جدول (۴) در می‌یابیم که حضور دو سیستم HVDC از پرباری پربارترین خطوط کاسته و توزیع توان رضایت‌بخش‌تری را در کلیه خطوط به همراه داشته است. در جدول (۷) و (۸) به ترتیب ولتاژ شین‌هایی که مبدل‌ها به آنها متصل شده‌اند (قبل و بعد از نصب مبدل‌ها) و مقادیر پارامترهای HVDC پس از بهینه‌سازی و انتخاب نقطه بهینه، نشان داده شده است.

مشخصات همگرایی سیستم ۳۰ شینه IEEE برای توابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.



با توجه به این که کشور عزیزمان ایران به واسطه وسعت جغرافیایی و به ویژه فاصله طولانی بین مراکز تولید بالقوه برق در جنوب و مراکز بزرگ مصرف شمال، وجود جزایر متعدد که برخی از آنها در آینده به عنوان مراکز تجاری مهم با مصرف بالای انرژی در منطقه مطرح خواهند بود و اتصال شبکه سراسری به شبکه کشورهای همسایه برای مبادلات انرژی، در آینده نه‌چندان دور به‌شدت نیازمند تکنولوژی‌های توانمند و به‌صرفه انتقال انرژی از جمله HVDC خواهد بود.

#### پی‌نوشت:

1- High Voltage Direct Current

تزیق توان برای شبیه‌سازی اثرات دو سیستم دو ترمیناله HVDC در محاسبات پخش بار بهینه و جابجایی بهینه مبتنی بر OPF استفاده شده است. هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند و شبیه‌سازی انجام شده روی سیستم‌های ۱۴ و ۳۰ شینه IEEE نشان دهنده کارایی مناسب این الگوریتم در بهینه‌سازی توابع هدف و تنظیمات سیستم HVDC نسبت به PST و OUPFC می‌باشد و از طرفی از پرباری پربارترین خطوط کاسته و توازن توان رضایت‌بخش‌تری را در کلیه خطوط برقرار کرده است. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که اگر کنورترهای HVDC شین‌های خطوطی که توان بیشتری را انتقال می‌دهند متصل گردند بهره‌برداری بهینه‌تری را از شبکه خواهیم داشت.

#### References

- [1] M.P. Bahrman, B. K.Johnson, "The ABCs of HVDC transmission technologies", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 5, No. 2, PP. 32-44, 2007.
- [2] J. Crpentier, "Contribution e l'etude do dispatching economique", Bulletin Society Francaise Electriciens, PP. 431-447, 1962.
- [3] H.W.Dommel, W.F.Tinney, "Optimal power flow solutions", IEEE Trans. on Pow. Aapp. and Sys. Vol. PAS-87, No. 10, pp. 1866-1876, Oct. 1968.
- [4] T.M.Haileselassie, K.Uhlen, "Power flow analysis of multi-terminal HVDC networks", IEEE Trondheim Power Tech, pp. 1-6, 2011.
- [5] X.P. Zhang, "Multiterminal voltage-sourced converter-based HVDC models for power flow analysis", IEEE Trans. on Power System, Vol. 19, No. 4, pp. 1877-1884, 2004.
- [6] J.Beerten, S.Cole, R.Belmans, "Generalized steady-state VSC MTDC model for sequential AC/DC power flow algorithm", IEEE Trans. on Power System, Vol. 27, No. 2, pp. 821-829, 2012.
- [7] J.Beerten, S.Cole, R.Belmans, "A sequential AC/DC power flow algorithm for networks containing multi-terminal VSC HVDC system", IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 2010.
- [8] M.Baradar, M.Ghandhari, D.Van Hertem, "The modeling multi-terminal VSC-HVDC in power flow calculation using unified methodology", IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, pp. 1-6, 2011.
- [9] J.Beerten, S.Cole, R.Belmans, "Implementation aspects of a sequential AC/DC power flow computation algorithm for muti-terminal VSC HVDC systems", IET International Conference on AC and DC Power Transmission, pp. 1-6, 2010.
- [10] S.H. Lee, Chu.Chia-Chi, "A web-based power Flow calculation of large-scale power systems embedded with VSC-based HVDC systems", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, pp. 1-9, 2005.
- [11] A.Panosyan, B.R.Oswald, "Modified newton-raphson load flow analysis for integrated AC/DC power systems", International Universities Power Engineering Conference, Vol. 3, pp. 1223-1227, 2004.
- [12] A.Pizano-Martinez, C.R.Fuerte-Esquivel, H.Ambriz-Perez, "Modeling of VSC-based HVDC systems for a Newton Raphson OPF algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 22, No. 4, pp. 1794-1803, 2007.
- [13] S.B.Warkad, M.K.Khedkar, G.M.Dhole, "A genetic algorithm approach for solving AC-DC optimal power flow problem", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 27-39, 2009.
- [14] C.N.Lu, S.S.Chen, C.M.Ing, "The incorporation of HVDC equations in optimal power flow methods using sequential quadratic programming techniques", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 1005-1011, 1988.
- [15] M. R. Alrashidi, M. E. El-Hawary, "Application of computatinal intelligence techniques for solving the revived optimal power flow problem", Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 4, pp. 694-702, 2009.
- [16] A. Lashkarara, A. Kazemi, S.A. Nabavi Niaki, "Optimal location of hybrid flow controller considering modified steady-state model", Applied Energy, Vol. 88, No. 5, pp. 1578-1585, 2011.
- [17] A. Lashkarara, A. Kazemi, S.A.Nabavi Niaki, "Multiobjective optimal location of FACTS shunt- series controllers for power system operation planning", IEEETrans. on power Delivery, 2011 (Accepted).
- [18] M.Noroozian, L.Angquist, M.Ghandhari, G.Andersson, "Use of UPFC for optimal power flow control", IEEE Trans. Pow. Del., Vol. 12, pp. 1629-1634, 1997.
- [19] M.A.Abido, "Optimal power flow using particle swarm optimization", Elect. Pow. Ene. Sys., Vol. 24, No. 7, pp. 563-571, 2002.
- [20] M.Varadarajan, K.S.Swarup, "Solving multi-objective optimal power flow using differential evolution", IET Gen. Trans. and Dis., Vol. 2, No. 5, pp. 720-730, 2008.

- [21] A.Lashkarara, A.Kazemi, S.A.Nabavi Niaki, "Modelling of optimal unified power flow controller (OUPFC) for optimal steady-state performance of power systems", Energy Convers Manage, Vol. 52, pp. 1325-1333, 2011.  
 [22] Power systems Test case, The University of Washington Archive <http://www.ee.washington.edu/research/pstca> [accessed 21.01.08].

ضمیمه

اطلاعات ژنراتورهای سیستم ۳۰ شینه [22]		اطلاعات ژنراتورهای سیستم ۱۴ شینه [22]	
محدودیت	تابع هدف	محدودیت	تابع هدف
$50 < P_{G1} < 200$	$C_1 = 0 + 2P_{G1} + 0.00375P_{G1}^2$	$22 < P_{G1} < 110$	$C_1 = 253 + 37.9P_{G1} + 0.253P_{G1}^2$
$20 < P_{G2} < 80$	$C_2 = 0 + 1.75P_{G2} + 0.0175P_{G2}^2$	$16 < P_{G2} < 80$	$C_2 = 1011 + 45.5P_{G2} + 0.379P_{G2}^2$
$15 < P_{G5} < 50$	$C_5 = 0 + P_{G5} + 0.0625P_{G5}^2$	$14 < P_{G3} < 70$	$C_3 = 506 + 37.9P_{G3} + 0.253P_{G3}^2$
$10 < P_{G8} < 35$	$C_8 = 0 + 3.25P_{G8} + 0.0834P_{G8}^2$	$18 < P_{G6} < 90$	$C_6 = 632 + 50.6P_{G6} + 0.379P_{G6}^2$
$10 < P_{G11} < 30$	$C_{11} = 0 + 3P_{G11} + 0.025P_{G11}^2$	$12 < P_{G8} < 60$	$C_8 = 758 + 37.9P_{G8} + 0.126P_{G8}^2$
$12 < P_{G13} < 40$	$C_{13} = 0 + 3P_{G13} + 0.025P_{G13}^2$		

داده‌های VSC-HVDC

$S_{base} = 100 \text{ MVA}$	
$G_{cm} = 9.9 \text{ p.u.}$	$B_{cm} = 99 \text{ p.u.}$
$1 \leq V_{cm} \leq 1.06$	$-\pi \leq \delta_{cm} \leq \pi$
$1 \leq P_{DC}^{loss} \leq 50 \text{ kW}$	
$P_{loss}^{Converter} \cong 0$	تلفات خود کانورتر در مقابل تلفات خط DC بحدی است که می‌توان کانورتر را ایده‌آل فرض نمود.