



## کاهش اقتصادی تلفات در شبکه های توزیع با انتخاب بهینه نوع هادی ها و محل و ظرفیت بهینه بانکهای خازنی با در نظر گرفتن اثرات هارمونیک

وحید مروستی      دکتر حسین عسکریان ایبانه      کاظم مظلومی  
vahid.marvasti@gmail.com      askarian@aut.ac.ir      kmazlumi@aut.ac.ir  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی قدرت)

کلید واژه - انتخاب هادی، بهینه سازی، جایابی خازن، کاهش تلفات، هارمونیک، هزینه اقتصادی.

اهمیت جلوگیری از هدرروی این سرمایه ملی را روز بروز برای ما روشن تر ساخته و طراحان سیستم های الکتریکی را وادار می سازد تا شبکه های الکتریکی با کمترین تلفات را بوجود آورند. تحقیقات در این زمینه نشان می دهد که نباید تنها به دنبال افزایش بودجه سالانه وزارتخانه یا سازمان برای افزایش میزان تولید برق بود، بلکه باید نسبت به کاهش تلفات برق در خطوط انتقال و فوق توزیع و توزیع نیز واکنش مقتضی نشان داد. زیرا کاهش تلفات بسیار کم هزینه تر از افزایش تولید می باشد. کاهش تلفات در سیستم های توزیع که بیشترین تلفات را شامل می شوند، به روشهای گوناگونی صورت می گیرد که یکی از آنها خازن گذاری بهینه و دیگری انتخاب بهینه هادی در این سیستم ها می باشد [۱]. مقالات متعددی در زمینه هر کدام از این روشها ارائه شده است ولی هیچکدام همزمان این دو روش را جهت بهینه سازی سیستم توزیع به کار نبرده اند. در این مقاله علاوه بر استفاده توأمان از دو روش مذکور، اثر غیرخطی بارها نیز در بهینه سازی در نظر گرفته شده است. امروزه به علت توسعه بارهای غیرخطی، اعوجاجات هارمونیک توسط این بارها به بقیه شبکه تزریق و با توجه به امپدانس شبکه به صورت

**چکیده** - در این مقاله چگونگی تعیین مقدار و جایابی بهینه بانکهای ثابت خازنی و نیز چگونگی انتخاب نوع و مقدار سطح مقطع هادی ها در خطوط توزیع شعاعی با حضور بارهای خطی و غیرخطی به منظور کاهش اقتصادی تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ نشان داده می شود. تابع هدف شامل ارزش اقتصادی تلفات توان و قیمت خازن ها و هادی ها با قیودی از جمله محدودیت ولتاژ، حداکثر جریان عبوری مجاز از هادی ها، مقدار اعوجاج هارمونیک کل مجاز و ظرفیت خازن ها و هادی های موجود و قابل استفاده می باشد. مقدار هارمونیکهای بار بطور دقیق در محاسبات وارد و در نهایت نتیجه کلی و دقیق اجرای این محاسبات روی یک سیستم توزیع شعاعی نمونه ۲۷ شینه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک نشان داده شده است.

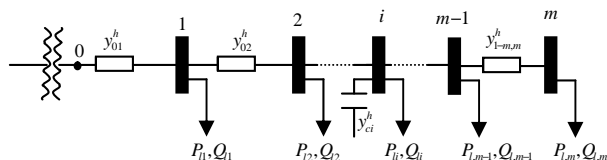
### ۱- مقدمه

کاهش اقتصادی تلفات در سیستمهای قدرت یکی از مباحث مهم در اقتصاد کشور بشمار می رود. گسترش روز افزون شبکه های توزیع و فوق توزیع و سرمایه گذاری اقتصادی در جهت توسعه آن و نیز بالا رفتن هزینه تولید و سوخت در نیروگاه ها

همچنین محدودیتهای مجاز برای هادی ها در سیستم توزیع به همراه ارزش اقتصادی آنها در نظر گرفته شده است. به علت گسسته بودن طبیعت دستگاه های جبران کننده توان راکتیو و نیز هادی ها، بهینه سازی باید شامل برنامه غیرخطی شامل ترکیب متغیرهای پیوسته و گسسته باشد که به علت کم بودن زمان همگرایی در الگوریتم ژنتیک در این مقاله جهت حل مسأله بهینه سازی از این الگوریتم استفاده شده است. در نهایت با پیاده سازی این روش ضمن بدست آوردن پروفیل مناسب برای ولتاژ و جریان، حداکثر کاهش اقتصادی تلفات و نیز جوابی قابل انعطاف در مورد متغیرهای گسسته حاصل شده است. مزایای این روش که کاهش اقتصادی تلفات بیشتری نسبت به وضعیت موجود دارد با مقایسه نتایج این روش با وضعیت موجود نشان داده شده است.

## ۲- مدلسازی سیستم در فرکانسهای پایه و هارمونیکی

در این قسمت چگونگی مدلسازی در فرکانسهای پایه و هارمونیکی بر روی یک سیستم مورد مطالعه نمونه مانند یک فیدر توزیع شعاعی با تعداد  $m$  شین که مطابق شکل (۱) می باشد نشان داده شده است.



شکل ۱- دیاگرام تک خطی از شبکه توزیع شعاعی

برای مدل کردن سیستم توزیع شکل (۱)، در فرکانسهای پایه و هارمونیکی، از روابط و فرضیات مرجع [۱۱] و جهت پخش بار هارمونیکی از مفاهیم مرجع [۱۲] استفاده شده است. اغلب تحلیل‌های هارمونیکی با استفاده از تکنیکهای حل مدارات خطی در حالت ماندگار انجام می گیرد. بارهای خطی عموماً شامل یک مقاومت موازی با یک راکتانس می باشند ولی منابع هارمونیکی که عناصر غیرخطی می باشند به صورت منابع تزریقی به شبکه خطی همراه با یک عنصر پسیو مدلسازی می شوند، بنابراین برای اغلب مطالعات پخش بار هارمونیکی، منابع هارمونیکی را می توان به صورت منابع ساده جریان هارمونیکی مدلسازی نمود. به منظور تحلیل و مدلسازی کامپیوتری منابع هارمونیکی، مرجع [۱۳] به کار برده شده است.

مراحل مدلسازی سیستم به صورت زیر می باشد:

(۱) توان اکتیو و راکتیو هر شین در فرکانس پایه از رابطه های (۱) تا (۴) بدست می آید .

اعوجاجات ولتاژ هارمونیکی به تجهیزات اعمال می شود. از مهمترین تجهیزاتی که تحت تأثیر این آلودگی هارمونیکی قرار می گیرد خازنهای مورد استفاده در شبکه می باشد. خازنهای موازی بطور گسترده در فیدرهای اولیه توزیع نصب می گردد تا بتوان از طریق اصلاح ضریب توان و همچنین آزاد کردن خطوط از عبور جریان راکتیو به دو هدف بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش تلفات دست یافت. گرچه خازنهای تجهیزاتی هستند که خود تولید هارمونیک نمی کنند، لیکن بر روی هارمونیکیهای موجود ناشی از بارهای غیرخطی تأثیراتی خاصی را بر جا می گذارند که لازم است اثرات آنها مطالعه شود. اولین اثر خازن، منحرف کردن مسیر هارمونیک جریان از مسیر اصلی یعنی از منابع تولید کننده هارمونیک به سوی شبکه می باشد و اثر دیگر آن اینست که می تواند باعث ایجاد تشدید در فرکانس طبیعی سیستم شود. بنابراین می توان با جایگذاری مناسب خازنها از نقطه نظر محل نصب و اندازه آن، تلاش کرد که رزونانس به فرکانسهای غیر مخرب انتقال یابد. به این منظور ضروری است انتخاب بهینه و جایابی بانکهای خازنی با لحاظ کردن سطوح هارمونیکی شینها بطور یکجا صورت بگیرد. اکثر تکنیکهای جایابی خازن با فرض شرایط سینوسی و صرفنظر از تأثیر هارمونیکیها انجام شده است [۲،۳،۴]. تحقیقات محدودی با در نظر گرفتن اثر هارمونیکیها روی تلفات سیستم شعاعی برای جایابی بهینه خازن صورت گرفته است که در اکثر آنها تنها ولتاژ ورودی شبکه، غیرسینوسی فرض و به حل مسئله پرداخته شده است [۷،۵،۶]. انتخاب بهینه نوع و سطح مقطع هادی ها در طراحی و بهینه سازی سیستم های توزیع نیز یک مقوله مهم در طراحی این سیستم ها بشمار می رود. تحقیقات محدودی نیز در زمینه انتخاب بهینه هادی ها در سیستم های توزیع صورت گرفته که به طور عمده در بیشتر آنها بر روی کاهش اقتصادی تلفات از طریق بهبود پروفیل هادی تمرکز شده است [۸،۹،۱۰]. در این مقاله تابع هدفی تشکیل می شود تا بتوان به حل مسأله بهینه سازی جایابی و انتخاب نوع هادی ها و محل آنها و همچنین جایابی بهینه و تعیین مقدار بانکهای خازنی بمنظور نصب در فیدرهای توزیع با در نظر گرفتن ارزش اقتصادی خازن ها و هادی ها و حفظ محدودیتهای هارمونیکی کیفیت توان و ولتاژ و جریان مجاز و محدودیتهای مجاز پرداخت. در این مقاله، کارکرد مصارف، بصورت خطی و غیرخطی در نظر گرفته شده و مقدار تزریق جریان هارمونیکی هر بار در محاسبات بطور کامل وارد می شود تا شبیه سازی را بتوان بطور دقیق برای هر نوع بار غیرخطی انجام داد همچنین اثر غیر خطی بارها روی کلیه شین ها و نه فقط چند شین بخصوص بررسی می گردد. در این مقاله

$$I_i^h = C(h)I_i^1 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^h & Y_{12}^h & 0 & \dots & \dots & 0 \\ Y_{21}^h & Y_{22}^h & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & Y_{m-1,m-1}^h & Y_{m-1,m}^h & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & Y_{m,m-1}^h & Y_{m,m}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^h \\ V_2^h \\ \dots \\ \dots \\ V_{m-1}^h \\ V_m^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^h \\ I_2^h \\ \dots \\ \dots \\ I_{m-1}^h \\ I_m^h \end{bmatrix}$$

$$(13)$$

$$Y_{ij}^h = \begin{cases} -y_{ij}^h & i \neq j \\ y_{i-1,i}^h + y_{i+1,i}^h + y_{ii}^h + y_{ci}^h & i = j \end{cases} \quad (14)$$

$$V_{rms(i)} = |V_i| = \sqrt{\sum_{h=1}^H |V_i^h|^2} \quad (15)$$

$$THD_i(\%) = \frac{100}{|V_i^1|} \sqrt{\sum_{h=2}^H |V_i^h|^2} \quad (16)$$

که در این معادلات داریم:

$V_i^1$  ولتاژ در فرکانس پایه مربوط به شین  $i$

$\theta_{ij}$  اندازه زاویه ادمیتانس مابین شین  $i$  و  $j$  ( $rad$ )

$\delta_i, \delta_j$  زاویه ولتاژ شین  $i$  و  $j$  ( $rad$ )

$G_{ii}, B_{ii}$  کندوکتانس و سوسپتانس خودی شین  $i$

$G_{ij}, B_{ij}$  کندوکتانس و سوسپتانس متقابل مابین شین  $i$  و  $j$

$P_i, Q_i$  توانهای اکتیو و راکتیو بار در شین  $i$

$P_{li}, Q_{li}$  توان های اکتیو و راکتیو خطی بار در شین  $i$

$P_{hi}, Q_{hi}$  توان های اکتیو و راکتیو غیرخطی بار در شین  $i$  و  $i+1$

$R_{i,i+1}, X_{i,i+1}$  مقاومت راکتانس خط مابین شین  $i$  و  $i+1$

$h$  مرتبه هارمونیک مورد نظر

$H$  بالاترین مرتبه هارمونیک مد نظر

$C(h)$  درصد جریان منابع جریان هارمونیک تولید شده توسط

هر مشتری نسبت به مؤلفه اصلی

### ۳- تابع هدف و قیود آن

(۲) ادمیتانس در فرکانس قدرت با استفاده از معادله (۵) و (۶) بدست می آید. اندازه و زاویه ولتاژ هر شین در فرکانس اصلی توسط معادله پخش بار به روش نیوتن-رافسون محاسبه شده و تلفات توان در فرکانس اصلی از رابطه (۷) محاسبه می گردد.

(۳) ادمیتانس های بار و خازنهای موازی و خطوط در فرکانسهای هارمونیک مرتبه  $h$  به ترتیب توسط معادلات (۸) تا (۱۰) محاسبه می گردد.

(۴) جریانهای تزریقی هارمونیک توسط بارهای غیرخطی از رابطه (۱۱) و (۱۲) بدست می آید. رابطه (۱۱) جریان هارمونیک تزریقی کل به هر شین می باشد و رابطه (۱۲) جریان هارمونیک مربوط به هر هارمونیک در شین مربوطه است که  $C(h)$  از آزمایش و آنالیز فوریه بر روی بار همه مشتریان در طول فیدر توزیع برای یک دوره زمانی ثابت بدست آمده است [۱۴].

(۵) مقدار ولتاژ هارمونیک هر شین از حل معادله ماتریسی (۱۳) بدست می آید که در آن  $Y_{ij}$  برابر معادله (۱۴) می باشد.

(۶) ولتاژ مؤثر ( $rms$ ) و مقدار اعوجاج کل ( $THD$ ) در مورد هر شین به ترتیب از روابط (۱۵) تا (۱۶) محاسبه می گردد.

$$P_i = |V_i^1|^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^m |V_i^1 V_j^1 Y_{ij}^1| \cos(\theta_{ij}^1 + \delta_j^1 - \delta_i^1) \quad (1)$$

$$Q_i = -|V_i^1|^2 B_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^m |V_i^1 V_j^1 Y_{ij}^1| \sin(\theta_{ij}^1 + \delta_j^1 - \delta_i^1) \quad (2)$$

که در آن:  $i = 1, 2, 3, \dots, m.$

$$P_i = P_{li} + P_{hi} \quad (3)$$

$$Q_i = Q_{li} + Q_{hi} \quad (4)$$

$$Y_{ij}^1 = |Y_{ij}^1| \angle \theta_{ij}^1 = \begin{cases} -y_{ij}^1 & i \neq j \\ y_{i-1,i}^1 + y_{i+1,i}^1 + y_{ci}^1 & i = j \end{cases} \quad (5)$$

$$Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (6)$$

$$P_{loss(i,i+1)}^1 = R_{i,i+1} [V_{i+1}^1 - V_i^1]^2 + X_{i,i+1} [y_{i,i+1}^1]^2 \quad (7)$$

$$y_{li}^h = \frac{P_{li}}{|V_i^1|^2} - j \frac{Q_{li}}{h|V_i^1|^2} \quad (8)$$

$$y_{ci}^h = h y_{ci}^1 \quad (9)$$

$$y_{i,i+1}^h = (R_{i,i+1} + jhX_{i,i+1})^{-1} \quad (10)$$

$$I_i^1 = \left[ \frac{P_{li} + jQ_{li}}{V_i^1} \right]^* \quad (11)$$

تلفات توان حقیقی کل برای شبکه نمونه شکل (۱) از رابطه (۱۷) محاسبه می شود. تابع هدف در واقع هزینه اقتصادی کل سالانه سیستم که در واقع مجموع ارزش اقتصادی تلفات توان و هزینه مربوط به نصب خازن ها و هادی ها می باشد در معادله شماره (۱۸) آورده شده که باید بهینه یا مینیمم شود. قیودی شامل محدودیتهای ولتاژ شین ها و حداکثر جریان مجاز هادی های منتخب که در معادله (۲۰) و (۲۱) و مقدار اعوجاج کل (THD) هر شین که در معادله (۲۲) آورده شده نیز در نظر گرفته می شوند که به صورت توابع پنالتی به تابع هدف اضافه شده اند. البته باید توجه داشت که تعیین دقیق ضرائب پنالتی بطور جداگانه برای هر قسمت تابع هدف در بهینه سازی مهم و ضروری است زیرا بسته به اهمیت بهینه سازی هر جزء این می توان با این ضرائب درجه اهمیت بهینه سازی هر جزء را نسبت به جزء دیگر در تابع هدف مشخص کرده و بهینه سازی مطلوب برسیم. در تابع هدف (۱۸) که شامل هفت عبارت می باشد عبارت سوم یعنی ارزش اقتصادی هادیها و عبارت ششم که بیانگر محدودیت اعوجاج کل شین ها می باشد و همچنین عبارت هفتم که بیانگر محدودیت جریان عبوری مجاز از هادی هاست نسبت به توابع هدف موجود اضافه گردیده است. این موضوع بیانگر جامعیت تابع هدف جدید می باشد.

$$P_{loss} = \sum_{h=1}^H \left( \sum_{i=0}^{m-1} P_{loss(i,i+1)}^h \right) \quad (17)$$

$$F = K_p P_{loss} + \sum_{j=1}^J K_j Q_j^c + \sum_{l=3}^L Z_l \times Length_l + \sum_{i=1}^m \{ \max(0, V_{min} - V_i)^2 + \max(0, V_i - V_{max})^2 + \max(0, THD_i - THD_{max})^2 \} + \sum_{l=3}^L (I_l - I_{max}^l)^2 \quad (18)$$

$$I_{max}^l = \begin{cases} I_{\max(ConType_l-1)} & \text{if } I_{\max(ConType_l)} \leq |I_l| \\ & , ConType_l \neq 1 \\ I_{\max(ConType_l)} & \text{else} \end{cases} \quad (19)$$

$$V_{min} \leq |V_i| \leq V_{max} \quad (20)$$

$$I_l \leq I_{\max}(l) \quad (21)$$

$$THD_i \leq THD_{\max} \quad (22)$$

در این معادلات داریم:

$P_{loss}$  تلفات توان کل

$Q_j^c$  اندازه خازن موازی نصب شده در شین  $j$

$m$  و  $J$  تعداد کل شین ها و تعداد شین های منتخب جهت خازن گذاری

$L$  تعداد کل هادی های موجود در شبکه

$Z_l$  ارزش اقتصادی هادی قرار گرفته در جایگاه  $l$  ام (R/Km)

$Length_l$  طول هادی واقع شده در جایگاه  $l$  ام (Km)

$F$  تابع هزینه سالانه کل

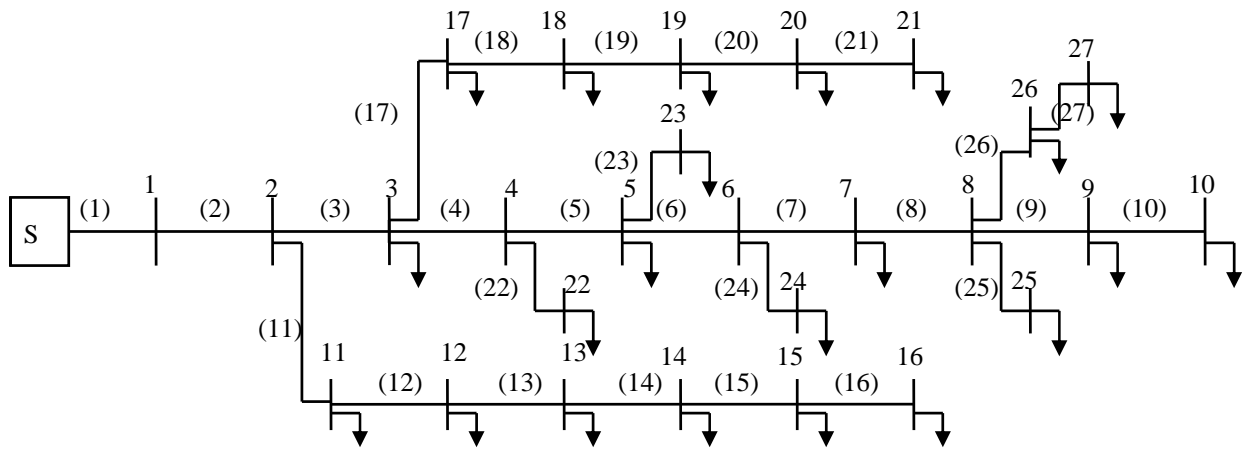
$V_{min}$  مینیمم مقدار ولتاژ مؤثر مجاز

$V_{max}$  ماکزیمم مقدار ولتاژ مؤثر مجاز

$K_p$  ارزش سالانه بر واحد تلفات توان

جدول ۱: اطلاعات بار و طول خطوط شبکه

Section	From	To	Conductor Type	Length [Km]	Load of Ending Node [KVA]	Power Factor	NonLinear (%)
۱	۰	۱	-	-	۰	-	-
۲	۱	۲	-	-	۰	-	-
۳	۲	۳	۱	۴/۷۳۵۴	۰	-	-
۴	۳	۴	۱	۲/۵۷۱۲	۱۳۵۰	۰/۸	۵۵/۷
۵	۴	۵	۱	۷/۳۱۲۳	۰	۰	۱۸/۹
۶	۵	۶	۱	۳/۳۳۸۱	۱۳۰۰	۰/۹۵	۳۲
۷	۶	۷	۲	۴/۵۲۱۹	۰	۰	۴/۷
۸	۷	۸	۲	۱۰/۵۵۰۷	۱۲۵۰	۰/۹	۱/۹
۹	۸	۹	۲	۱۱/۷۵۶۷	۰	۰	۳۸/۲
۱۰	۹	۱۰	۲	۴/۷۳۵۴	۱۳۱۳	۰/۸	۴/۵
۱۱	۲	۱۱	۲	۲/۵۷۱۲	۱۱۰۰	۰/۹۵	۴/۰
۱۲	۱۱	۱۲	۳	۷/۳۱۲۳	۴۰۰	۰/۷۵	۹۲/۱
۱۳	۱۲	۱۳	۳	۳/۳۳۸۱	۱۳۵۰	۰/۸۵	۱۸/۲
۱۴	۱۳	۱۴	۳	۴/۵۲۱۹	۱۲۲۵	۰/۸۲	۳۵/۱
۱۵	۱۴	۱۵	۳	۱۰/۵۵۰۷	۱۱۲۵	۰/۹۳	۱۸/۳
۱۶	۱۵	۱۶	۳	۱۱/۷۵۶۷	۱۳۰۰	۰/۷۵	۱۲/۴
۱۷	۳	۱۷	۲	۴/۷۳۵۴	۳۰۰	۰/۹	۶/۲
۱۸	۱۷	۱۸	۲	۲/۵۷۱۲	۱۱۵۰	۰/۸	۴/۵
۱۹	۱۸	۱۹	۳	۷/۳۱۲۳	۳۵۰	۰/۸۵	۲۶/۱
۲۰	۱۹	۲۰	۳	۳/۳۳۸۱	۴۰۰	۰/۸	۱/۲
۲۱	۲۰	۲۱	۳	۴/۵۲۱۹	۱۱۰۰	۰/۸	۳/۲
۲۲	۴	۲۲	۳	۱۰/۵۵۰۷	۱۲۵	۰/۹۳	۵۳/۱
۲۳	۵	۲۳	۳	۱۱/۷۵۶۷	۹۶۵	۰/۸۹	۲۲/۳
۲۴	۶	۲۴	۳	۴/۷۳۵۴	۹۸۲	۰/۸۸	۳/۵
۲۵	۸	۲۵	۳	۲/۵۷۱۲	۱۳۰۰	۰/۹	۸/۶
۲۶	۸	۲۶	۴	۷/۳۱۲۳	۸۷۵	۰/۷۵	۵/۳
۲۷	۲۶	۲۷	۴	۳/۳۳۸۱	۲۰۰	۰/۹	۱۳/۴



شکل ۲- سیستم توزیع شعاعی نمونه ۲۷ شینه

جبران سازی توان راکتیو، اندازه بزرگترین خازن  $Q_{max}^C$  نباید از مجموع کل بار راکتیو سیستم تجاوز کند و این مسأله در این شبیه سازی رعایت شده است. بمنظور لحاظ کردن مسئله اقتصادی در این مقاله ارزش اقتصادی خازنهای موجود با واحد ارزش واقعی بر  $kvar$  و ارزش اقتصادی هادی ها با واحد ارزش واقعی بر  $Km$  به کار برده شده است.

$I_{max}^l$  حداکثر جریان مجاز گذرنده از هادی واقع در قسمت  $l$  ام

$THD_{max}$  مقدار ماکزیمم اعوجاج کل مجاز

$K_j^C$  ارزش سالانه خازن بر  $kvar$

$ConType_l$  شماره نوع هادی قرار گرفته در قسمت  $l$  ام طبق جدول (۲)

جدول ۲: مشخصه مقاومت و راکتانس خطوط ۱ و ۲ شبکه ۲۷ شینه

شماره شین	$R$ [ $\Omega/Km$ ]	$X$ [ $\Omega/Km$ ]
۱	۰/۱۲۳۳	۰/۴۱۲۷
۲	۰/۰۱۴	۰/۶۰۵۱

جدول ۳: مشخصه نوع، اندازه و قیمت هادی های موردنظر

نوع هادی (ConType)	$R$ [ $\Omega/Km$ ]	$X$ [ $\Omega/Km$ ]	قیمت [R/Km]	ماکزیمم جریان A
۱	۰/۱۵۷۶	۰/۲۲۷۷	۱۴۳۳۰۸۴	۵۲۰
۲	۰/۲۷۱۲	۰/۳۴۶۴	۷۶۵۹۰۰	۳۱۰
۳	۰/۲۷۳۳	۰/۲۵۰۶	۶۶۵۴۸۲	۲۸۸
۴	۰/۴۵۴۵	۰/۲۶۶۴	۴۵۴۴۱۰	۲۱۲
۵	۰/۷۸۲۲	۰/۲۸۳۵	۲۸۹۳۵۸	۱۵۰

جدول ۴: اندازه و قیمت خازنهای صنعتی ۳ فاز موجود

اندازه kvar	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰
قیمت \$	۷۵۰	۹۷۵	۱۱۴۰	۱۳۲۰	۱۶۵۰	۲۰۴۰

#### ۴- اجرای بهینه سازی روی یک سیستم نمونه

شبکه نمونه استفاده شده در این مقاله جهت بهینه سازی، شبکه توزیع شعاعی شکل (۲) با تعداد ۲۷ شین با فرض فرکانس پایه  $60Hz$  می باشد. اطلاعات بار، نوع و طول خطوط این شبکه در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. نوع بار در نظر گرفته شده در شین های دارای بار، ترکیبی از بار خطی و غیرخطی می باشد. مطلوب این مقاله یافتن مکان و اندازه بهینه خازن ها در هر ۲۷ شین و نیز مشخص کردن نوع بهینه هادی ها طبق جدول (۳) است. در این بهینه سازی تنها مشخصه خطوط ۱ و ۲ شبکه شکل (۲) ثابت و مطابق جدول (۲) می باشد. مشخصه و نوع هادی های منتخب جهت جایگذاری در شبکه در جدول (۳) آورده شده است. در این جدول مقدار مقاومت و راکتانس و قیمت در واحد طول ۵ نوع هادی و نیز حداکثر جریان مجاز عبوری از آنها بر حسب آمپر آورده شده است. با توجه به اطلاعات داده شده  $J=27$  و  $L=25$  است. جهت بهینه سازی مقدار  $K_p$  برابر با  $168 \frac{R}{kv}$  انتخاب و محدوده ولتاژ مؤثر به صورت  $V_{min} = 1/0.5 p.u$  و  $V_{max} = 0/92 p.u$  در نظر می گیریم. ماکزیمم  $THD$  مجاز در شبکه جهت بهینه سازی ۳٪ در نظر گرفته شده است. در محاسبات و شبیه سازی انجام شده کلیه کمیات بر حسب پریونیت در نظر گرفته شده است. مبنای ولتاژ و توان به ترتیب  $23kv$  و  $100VA$  فرض می شود. بمنظور

**جدول ۵: اندازه و قیمت سالیانه خازنهای ثابت قابل انتخاب**

شماره خازن	۱	۲	۳	۴	۵
اندازه خازن (kvar)	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۶۰۰	۹۰۰
قیمت خازن (\$/kvar)	۰/۵	۰/۳۵	۰/۲۳۵	۰/۲۲	۰/۱۸۳
شماره خازن	۶	۷	۸	۹	۱۰
اندازه خازن (kvar)	۱۰۵۰	۱۲۰۰	۱۳۵۰	۱۵۰۰	۱۶۵۰
قیمت خازن (\$/kvar)	۰/۲۲۸	۰/۱۷	۰/۲۰۷	۰/۲۰۱	۰/۱۹۳
شماره خازن	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
اندازه خازن (kvar)	۱۸۰۰	۱۹۵۰	۲۱۰۰	۲۵۵۰	۲۷۰۰
قیمت خازن (\$/kvar)	۰/۱۸۷	۰/۲۱۱	۰/۱۷۶	۰/۱۸۹	۰/۱۸۷
شماره خازن	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
اندازه خازن (kvar)	۲۸۵۰	۳۰۰۰	۳۴۵۰	۳۷۵۰	۴۰۵۰
قیمت خازن (\$/kvar)	۰/۱۸۳	۰/۱۸	۰/۱۸۸	۰/۱۸۳	۰/۱۷۹

جدول (۴) یک نمونه از قیمت سالانه خازن های ثابت صنعتی موجود در بازار با اندازه های متفاوت را نشان می دهد. در جدول (۵) قیمت و اندازه بانکهای خازنی قابل انتخاب از جدول (۴) برای سیستم نمونه شکل (۲) نشان داده می شود (این قیمت در واقع مجموع هزینه های خرید و نصب و راه اندازی و نگهداری را نیز شامل می شود).

**جدول ۶: مقدار منابع جریان هارمونیک در هر شین**

شماره شین	درصد جریان هارمونیک نسبت به مؤلفه اصلی در هارمونیک مورد نظر							
	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۶/۲	۳/۶	۱/۳	۰/۸	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲
۵	۱۷/۷	۲/۹	۴/۵	۸/۲	۵/۴	۲/۹	۲/۹	۰
۶	۰	۰	۹/۶	۵/۸	۰	۰	۳/۶	۳/۰
۷	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۸	۰/۸	۰/۵	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۱۵/۱	۸/۸	۳/۰	۱/۸	۱/۲	۱/۰	۰/۶	۰/۵
۱۰	۰	۰	۳/۶	۲/۳	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۱/۱
۱۱	۳/۱	۱/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۱۲	۶/۲	۳/۶	۱/۳	۰/۸	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲
۱۳	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۶	۰
۱۴	۰/۸	۰/۵	۰/۲	۰	۲/۵	۰	۰	۰
۱۵	۰	۰	۳/۶	۳/۳	۰/۹	۰/۶	۰/۵	۱/۱
۱۶	۹/۱	۵/۳	۱/۸	۱/۲	۰/۷	۰/۶	۰/۴	۰/۳
۱۷	۳/۱	۱/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۱۸	۶/۲	۳/۶	۱/۳	۱/۸	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲
۱۹	۱۵/۱	۸/۸	۳/۰	۱/۸	۱/۲	۱/۰	۰/۶	۰/۵
۲۰	۰	۰	۳/۶	۲/۳	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۱/۱
۲۱	۳/۱	۱/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۲۲	۶/۲	۳/۶	۱/۳	۰/۸	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲
۲۳	۰/۸	۰/۵	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰
۲۴	۰	۰	۳/۶	۲/۳	۰/۲	۰/۷	۰/۵	۱/۱
۲۵	۹/۱	۵/۳	۱/۸	۲/۱	۰/۷	۰/۶	۰/۴	۰/۳
۲۶	۱۸/۷	۲/۹	۴/۵	۸/۲	۵/۴	۲/۹	۲/۹	۰
۲۷	۰	۰	۹/۶	۵/۸	۰/۳	۰	۳/۶	۳/۰

درصد جریان هارمونیک بارهای غیرخطی در این شبکه نسبت

به مؤلفه اصلی تا فرکانس  $1/\delta kHz$  برای ۸ هارمونیک فرد به صورت جدول (۶) مفروض است.

**۵- نتایج شبیه سازی**

نتایج حاصله قبل و بعد از بهینه سازی در جدول (۷) به خوبی نشان داده شده است.

**۵-۱- قبل از بهینه سازی:**

بمنظور مقایسه نتایج برنامه بهینه سازی نوع هادی های شبکه قبل از بهینه سازی مجدداً در جدول (۷) در کنار نتایج حاصله آورده شده است. مقدار ولتاژ مؤثر و مقدار اعوجاج کل  $THD$  مربوط به هر شین قبل و بعد از خازن گذاری و جایابی بهینه هادی ها روی شبکه در جدول (۷) نشان داده شده است. در این حالت ماکزیمم و مینیمم ولتاژ مؤثر شین های شبکه به ترتیب برابر با  $0/986$  و  $0/796$  پریونیت می باشد که در واقع بیشترین افت ولتاژ را روی شین شماره ۱۰ شبکه داریم. ماکزیمم  $THD$  مربوط به شین شماره ۲۷ می باشد که مقدار آن  $6/59$  درصد می باشد. مقدار تلفات کل شبکه در این حالت برابر با  $MW$   $1/5747$  بوده و هزینه کل بر حسب ریال با احتساب ارزش اقتصادی تلفات برابر با  $152$  میلیون ریال می باشد (باید توجه داشت که این ارقام نسبی بوده و در این شبکه می تواند بیانگر کاهش هزینه اقتصادی باشد).

**۵-۲- پس از خازن گذاری و انتخاب بهینه هادی ها**

بهینه سازی روی تابع هدف ایجاد شده با محدودیتهای مجاز موجود شبکه و هادی های مربوطه صورت گرفته و نتایج آن که شامل نوع بهینه هادی مربوط به هر قسمت، مقدار ظرفیت بانک خازنی، مقدار ولتاژ مؤثر و اعوجاج کل  $THD$  مربوط به هر شین می باشد در جدول (۷) در کنار نتایج قبل از بهینه سازی آورده شده است تا بتوان نتایج را با نتایج قبل از بهینه سازی مقایسه کرد. مشاهده می شود در این حالت ماکزیمم و مینیمم ولتاژ مؤثر شین های شبکه به ترتیب برابر با  $1/002$  و  $0/931$  پریونیت می باشد که در محدوده مجاز ماکزیمم و مینیمم ولتاژ مؤثر در بهینه سازی مربوطه که به ترتیب برابر با  $1/05$  و  $0/92$  پریونیت بود قرار دارد. حداکثر  $THD$  بدست آمده مربوط به شین شماره ۱۵ می باشد که مقدار آن برابر با  $2/62$  درصد است. مشخص است که این مقدار نیز در محدوده مجاز خود که حداکثر آن ۳ درصد بود می باشد. تلفات شبکه در این حالت  $700 KW$  حاصل شده است که در مقایسه با قبل از بهینه سازی کاهش قابل توجهی در حدود  $50\%$  داشته است. مقدار تابع هزینه کل نیز در

باشد. بهینه کردن این تابع هدف در حالیکه اثر بارهای غیرخطی و محدودیتهای مجاز نیز در آن منظور شده توسط الگوریتم ژنتیک بعثت سرعت بالای همگرایی آن صورت می گیرد که در نتیجه این بهینه سازی ظرفیت بانکهای خازنی و نوع هادی ها در شبکه توزیع شعاعی بگونه ای حاصل شد که علاوه بر کاهش چشمگیر تلفات، هزینه اقتصادی کل نیز کاهش یافت. ظرفیت بانکهای خازنی و نوع هادی بدست آمده در شبکه مطابق با مقادیر موجود آن در صنعت می تواند باشد. در نهایت نتایج حاصله برای ولتاژ و مقدار اعوجاج کل شین ها پس از بهینه سازی بهبود یافته و در محدوده مجاز خود قرار گرفته و کاهش اقتصادی تلفات حاصل شده است.

## مراجع

- [1] H. N. Ng, M. M. A. Salama, and A.Y. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, pp. 387-392, 2000.
- [2] Delfanti, M.; Granelli, G.P.; Marannino, P.; Montagna, M., "Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, Issue 3, pp. 1041-1046, 2000.
- [3] Gallego, R.A.; Monticelli, A.J.; Romero, R. "Optimal capacitor placement in radial distribution networks," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, Issue 4, pp. 630-637, 2001.
- [4] Hsiao, Y.-T.; Chien, C.-Y., "Optimisation of capacitor allocation using an interactive trade-off method," IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, Issue 4, pp. 371-374, 2001.
- [5] Masoum, M.A.S.; Jafarian, A.; Ladjevardi, M.; Fuchs, E.F.; Grady, W.M., "Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, Issue 2, pp. 822-829, 2004.
- [6] Masoum, M.A.S.; Ladjevardi, M.; Jafarian, A.; Fuchs, E.F., "Optimal placement, replacement and sizing of capacitor Banks in distorted distribution networks by genetic algorithms," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, Issue 4, pp.1794-1801, 2004.
- [7] T.M. Khalil, K.M. Youssef, M.M. Abdel Aziz, "A Binary Particle Swarm Optimization for Optimal Placement and Sizing of Capacitor Banks in Radial Distribution Feeders with Distorted Substation Voltages," AIML 06 International Conference, Sharm El Sheikh, Egypt, 2006.
- [8] Mandal, S.; Pahwa, A., "Optimal selection of conductors for distribution feeders", IEEE Trans., Power Systems, Vol. 17, Issue 1, pp. 192-197, 2002.
- [9] S. Sivanagaraju, N. Sreenivasulu, M. Vijayakumar, T. Ramana, "Optimal conductor selection for radial distribution", Electric Power System Research, Vol.

این حالت برابر با ۱۱۷ میلیون ریال شده است که این کاهش ۳۵ میلیون ریالی به علت کاهش تلفات در شبکه و بهینه کردن نوع هادی های شبکه از نظر مشخصه می باشد. به جهت کاهش مقدار اعوجاج کل در شین های شبکه باید هزینه اضافی صورت بگیرد که این هزینه باعث می شود مقدار هزینه کل در بهینه سازی نسبت به حالات قبل از بهینه سازی به مقدار کمی کاهش یابد در صورتیکه مسئله کنترل  $THD$  شین ها را در نظر نگیریم مسلماً کاهش هزینه اقتصادی بیشتری را خواهیم داشت.

جدول ۷: نتایج قبل و بعد از بهینه سازی برای شبکه ۲۷ شینه

Section	From	To	Conductor Typr before Optimization	Voltage before Optimization [p.u.]	THD before Optimization %	Conductor Typr after Optimize	Capacitor Size after Optimization [Kvar]	Voltage after Optimization [p.u.]	THD after Optimization %
۱	۰	۱	-	۰/۹۸۶	۰/۴۱	-	۰	۱/۰۰۲	۰/۳۳
۲	۱	۲	-	۰/۹۷۲	۰/۹۹	-	۴۰۵۰	۱/۰۱۲	۰/۸۰
۳	۲	۳	۱	۰/۹۳۷	۱/۸۶	۱	۰	۰/۹۹۸	۱/۰۱
۴	۳	۴	۱	۰/۹۲۴	۲/۲۵	۱	۲۸۵۰	۰/۹۹۴	۱/۲۰
۵	۴	۵	۱	۰/۸۹۰	۳/۲۹	۱	۰	۰/۹۶۶	۱/۱۳
۶	۵	۶	۱	۰/۸۷۷	۳/۷۹	۱	۰	۰/۹۵۶	۱/۲۵
۷	۶	۷	۲	۰/۸۵۸	۴/۳۵	۲	۰	۰/۹۵۴	۱/۳۲
۸	۷	۸	۲	۰/۸۱۵	۵/۸۱	۲	۰	۰/۹۴۹	۱/۶۵
۹	۸	۹	۲	۰/۸۰۲	۶/۰۹	۵	۰	۰/۹۳۷	۱/۸۲
۱۰	۹	۱۰	۲	۰/۷۹۶	۶/۲۲	۵	۰	۰/۹۳۱	۱/۹۲
۱۱	۲	۱۱	۲	۰/۹۵۹	۱/۱۵	۳	۳۷۵۰	۱/۰۱۱	۱/۲۸
۱۲	۱۱	۱۲	۳	۰/۹۲۹	۱/۵۸	۳	۲۱۰۰	۱/۰۰۳	۱/۹۵
۱۳	۱۲	۱۳	۳	۰/۹۱۶	۱/۷۹	۴	۰	۰/۹۹۷	۱/۹۶
۱۴	۱۳	۱۴	۳	۰/۹۰۴	۲/۰۶	۴	۰	۰/۹۹۸	۲/۰۷
۱۵	۱۴	۱۵	۳	۰/۸۸۴	۲/۶۷	۵	۴۵۰	۰/۹۷۷	۲/۶۲
۱۶	۱۵	۱۶	۳	۰/۸۷۲	۳/۱۹	۵	۹۰۰	۰/۹۶۷	۳/۴۱
۱۷	۳	۱۷	۲	۰/۹۲۶	۲/۱۳	۵	۰	۰/۹۸۶	۱/۴۲
۱۸	۱۷	۱۸	۲	۰/۹۲۰	۲/۲۷	۵	۱۳۵۰	۰/۹۸۱	۱/۶۵
۱۹	۱۸	۱۹	۳	۰/۹۰۹	۲/۴۹	۵	۰	۰/۹۷۲	۱/۶۲
۲۰	۱۹	۲۰	۳	۰/۹۰۶	۲/۵۵	۵	۰	۰/۹۶۷	۱/۶۲
۲۱	۲۰	۲۱	۳	۰/۹۰۲	۲/۶۰	۵	۰	۰/۹۶۲	۱/۶۳
۲۲	۴	۲۲	۳	۰/۹۲۳	۲/۲۵	۵	۰	۰/۹۹۲	۱/۱۹
۲۳	۵	۲۳	۳	۰/۸۸۱	۳/۳۱	۵	۰	۰/۹۵۴	۱/۱۲
۲۴	۶	۲۴	۳	۰/۸۷۳	۳/۸۸	۴	۰	۰/۹۴۸	۱/۳۳
۲۵	۸	۲۵	۳	۰/۸۱۲	۵/۹	۵	۱۰۵۰	۰/۹۴۷	۱/۷۸
۲۶	۸	۲۶	۴	۰/۸۰۶	۶/۵۵	۴	۰	۰/۹۵۶	۱/۹۳
۲۷	۲۶	۲۷	۴	۰/۸۰۵	۶/۵۹	۴	۳۶۰۰	۰/۹۶۱	۲/۳۱

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله تابع هدف جدیدی که در واقع هزینه کلی جهت بهینه سازی شبکه توزیع شعاعی می باشد تشکیل شد که شامل قیود محدودیت های ولتاژ شین ها، حداکثر جریان مجازی عبوری از هادی ها و مقدار اعوجاج کل مجاز در شین ها می

- 63, pp. 95-103, 2002.
- [10] Z. Wang, H. Liu, D. C. Yu, X. Wang, H. Song, "A practical approach to the conductor size selection in planning radial distribution systems", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 350-353, 2000.
  - [11] Y. Baghzouz and S. Ertem, "Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltages," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol 5, pp 650-657, 1990.
  - [12] S. Herraiz, L. Sainz, and J. Cluab "Review of Harmonic Load Flow Formulations," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, pp. 1079-1087, 2003.
  - [13] Acha and M. Madrigal, *Power Systems Harmonics*. John Wiley & Sons, England, 2002.
  - [14] T.S. Chung, H.C. Leung, "A genetic algorithm approach in optimal capacitor selection with harmonic distortion considerations," *Electrical Power and Energy systems* 21 (Elsevier), pp. 561-569, 1999.



This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.