

## مقایسه مدل‌های بار در محیط‌های هارمونیکی و شبیه‌سازی بر روی شبکه‌الکتریکی یک واحد صنعتی

علیرضا جلیلیان<sup>۱</sup>

امیر اصلانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران

<sup>۲</sup>شرکت فرآب - وزارت نیروی جمهوری اسلامی ایران

**چکیده**- با افزایش بارهای غیر خطی در سیستم‌های توزیع لازم است فیلتر گذاری‌های مناسبی جهت حذف جریانهای هارمونیکی در شبکه انجام گیرد. با توجه به مدل‌های مختلف بار در شرایط هارمونیکی، فرکانس‌های رزونانس و امپدانسهای رزونانس متفاوتی پدید می‌آید. در این مقاله مدلسازی بارها به سه صورت مدل بار عادی، مدل بار CIGRE و مدل بارهای موتورهای ارائه شده است. در ادامه با انجام شبیه‌سازی بر روی یک شبکه نمونه، در شرایط مختلف هارمونیکی فرکانس رزونانس، امپدانس و مقدار THD ولتاژ در نقاط مختلف شبکه محاسبه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همچنین مدل‌های مختلف بار در این مقاله با یکدیگر مقایسه و مزایا و معایب هر کدام مشخص شده است.

**کلید واژه:** هارمونیکی، مدل‌سازی بار

### ۱- مقدمه

افزایش بارهای غیر خطی در سیستم‌های توزیع انرژی باعث افزایش اغتشاش در شکل موجهای ولتاژ و جریان شده که این اغتشاشات باعث افزایش تلفات و کاهش کیفیت توان می‌شوند. در اکثر کارخانجات صنعتی بارها از تعداد زیادی موتور کوچک و بزرگ تشکیل شده است. برای طراحی فیلتر در این شرایط از مدل بار عادی یا مدل بار CIGRE استفاده می‌شود.

باتوجه به مدل‌های مختلف بار رزونانس‌های متفاوتی در شبکه پیش می‌آید که طراحی فیلتر هارمونیکی را تحت تاثیر قرار میدهد. در مقاله‌های قبل مقایسه‌هایی بین مدل فرکانسی بارها در محیط هارمونیکی با استفاده از دو مدل بار عادی و مدل بار CIGRE در محیط EMTP و برای یک شبکه نمونه انجام شده است [1].

در این مقاله از اطلاعات شبکه‌الکتریکی یک واحد صنعتی که یک شبکه 63/20/6.3/3/0.4 کیلوولت می‌باشد استفاده شده است. شکل (۱) شماتیک کلی شبکه‌الکتریکی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نرم افزارهای بکار گرفته شده در این شبیه‌سازی برنامه‌های EMTP<sup>16</sup> و ATP<sup>17</sup> می‌باشند. ابتدا امپدانس و فرکانس رزونانس در نقاط مختلف شبکه در هر سه مدل مختلف بار (مدل عادی، مدل CIGRE و مدل موتوری) با استفاده از قابلیت Frequency Scan، ATP بدست آمده اند. سپس اغتشاشاتی که مربوط به حضور منابع هارمونیکی در شبکه می‌باشند با استفاده از قابلیت Harmonic Frequency Scan برنامه EMTP بدست آمده اند. در این حالت بارهای غیر خطی بصورت منبع جریان هارمونیکی با دامنه، فرکانس و فاز مشخص مدل شده اند.

<sup>16</sup> Electromagnetic Transient Program

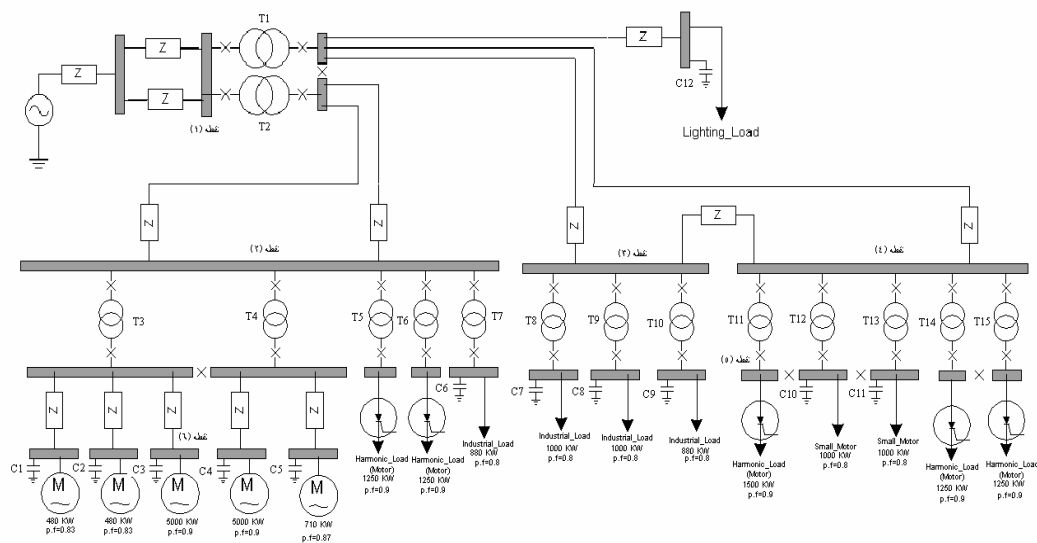
<sup>17</sup> Alternative Transients Program

## ۲- مدلسازی

### ۲-۱ مدلسازی شبکه

راکتانس اتصال کوتاه در پست بالا دست مدل شده است. این پست از طریق دو خط ۶۳ کیلوولت هر کدام به طول ۵ کیلومتر به پست واحد صنعتی متصل می باشد. بارها به سطوح ولتاژ ۶/۳ کیلوولت، ۳ کیلوولت و ۰/۴ کیلوولت متصل می باشند.

شکل (الف) ضمیمه، شماتیک شبکه مورد مطالعه ساخته شده با ATPDRAW را نشان می دهد. تغذیه سیستم در شبکه با مدار معادل سیستم در سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت و با استفاده از



شکل (۱): شماتیک کلی شبکه مورد مطالعه

### ۲-۲ مدلسازی ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورها بدون توجه به مدلسازی اشباع ترانسفورماتور در محیط EMTP مدل شده اند. در این مدلسازی تغییرات فرکانسی پارامترهای سری ترانسفورماتور با استفاده از روابط زیر منظور شده است [۲]:

$$R(h) = R [1 + a_R (h-1)^{b_R}] \quad (1)$$

$$L(h) = L \times a_L (h)^{b_L} \quad (2)$$

بطوریکه  $h$  مرتبه هارمونیک بوده و  $a_L, b_L, a_R, b_R$  ضرایبی هستند که با توجه به ظرفیت ترانسفورماتور و سطح ولتاژ آن بدست می آیند. جدول (۱) مشخصات

مشخصات کابلها در جدول (الف) ضمیمه نشان داده شده است. با وجود اینکه طول این کابلها کم می باشد ولی بخاطر دقت در محاسبات مدلسازی آنها از طریق پارامترهای گسترده کابل و مدل فرکانسی (JMARTI) کابل انجام شده است. مدلسازی خطوط انتقال با استفاده مدل فرکانسی خط (مدل JMARTI) انجام شده است. در این مدلسازی از مشخصات هادی (نوع، سطح مقطع، مقاومت DC و . . .) و نیز مشخصات دکل (ارتفاع دکل، ارتفاع هر هادی از زمین واز وسط دکل، فاصله فلش سیم گارد و هادی از زمین و . . .) استفاده شده است. مشخصات شبکه مورد مطالعه در جدول (ب) ضمیمه آمده است.

جدول (۲): مشخصات بارهای موجود در شبکه مورد مطالعه

ولتاژ (kV)	ضریب توان	توان اکتیو (kW)	نوع	بارها
۶/۳	۰/۸۳	۴۸۰	موتوری	M1 , M2
۶/۳	۰/۹	۵۰۰۰	موتوری	M3 , M4
۶/۳	۰/۸۷	۷۱۰	موتوری	M5
۰/۴	۰/۹	۱۲۵۰	هارمونیکی	L01 , L02 L10 , L11
۰/۴	۰/۸	۱۰۰۰	موتوری ، کوچک	L04 , L05
۰/۴	۰/۸	۸۸۰	صنعتی ، روشنایی	L03 , L06
۳	۰/۹	۱۵۰۰	هارمونیکی	L07
۲۰	۰/۸	۱۵۰۰	روشنایی	L12

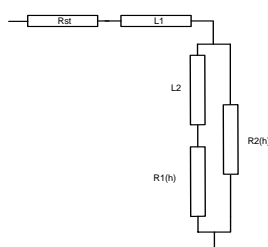
$$R = \frac{U^2}{P_n} \quad X_L = j \frac{U^2}{Q_n}$$

شکل (۲): مدل تکفاز بار عادی [۳]

$$X_s = j0.073hR \quad X_p = j \frac{hR}{6.7 \left( \frac{Q_n}{P_n} \right) - 0.74}$$

$$R = \frac{U^2}{P_n}$$

شکل (۳): مدل تکفاز بار CIGRE [۳]



شکل (۴): مدل تکفاز بار موتوری [۲]

ترانسفورماتورهای موجود در شبکه مورد مطالعه را که همگی دارای اتصال  $\Delta Y$  می باشند نشان می دهد.

جدول (۱): مشخصات ترانسفورماتورهای شبکه مورد مطالعه

امپدانس درصد (%X)	ظرفیت (MVA)	سطح ولتاژ (kV)	ترانسفورماتور
۱۲	۳۰	۶۳/۲۰	T1 , T2
۱۰	۱۵	۲۰/۶/۳	T3 , T4
۶	۱/۶	۲۰/۳	الی T11 T13
۶	۱/۶	۲۰/۰/۴	و T5-T10 T14 , T15

### ۲-۳- مدلسازی بارها

در این مطالعه برای بارها سه نوع مدل مختلف بکار گرفته شده است. در مدل اول (مدل بار عادی [۳]) امپدانس بار با تغییرات فرکانس تغییر نمی کند. فرم تک فاز این مدل در شکل (۲) نشان داده شده است.

مدل دوم مدل پیشنهادی توسط CIGRE [۳] است که در آن امپدانس بار با تغییر فرکانس تغییر می کند. شکل (۳) مدل پیشنهادی تک فاز این نوع مدل بار را نشان می دهد.

مدل سوم مدل فرکانسی موتورهای القایی است که بارهای موتوری را توسط مدل فرکانسی این بارها مدلسازی می کند [۲]. شکل (۴) مدل فرکانسی تک فاز بارهای موتوری را نشان می دهد. پارامترهای این مدل در ضمیمه آمده است. مدل بار موتوری در محیط فرکانسی در برنامه EMTP توسط نویسنده و با توجه به کد نویسی مدل پیشنهادی موتور القایی در راهنمای EMTP جهت آنالیز هارمونیکی ایجاد شده است. مشخصات بارهای موجود در شبکه مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است.

#### ۴-۲- مشخصات خازنها

مشخصات خازنهای نصب شده در شبکه مورد مطالعه که تماماً با اتصال مثلث هستند در جدول (۳) نشان داده شده است.

**جدول (۳):** مشخصات خازنهای شبکه مورد مطالعه

۲۹/۱	۱۸۲/۲	I <sub>11</sub>
۲۴/۶	۱۵۴/۲	I <sub>13</sub>
۱۸/۹	۱۱۷/۹	I <sub>17</sub>
۱۶/۹	۱۰۵/۵	I <sub>19</sub>
۱۴	۸۷/۱	I <sub>23</sub>
۱۳	۸۰/۱	I <sub>25</sub>

خازنها	ولتاژ نامی V <sub>LL</sub> (kV)	ظرفیت خازن (kVar)
C1, C2, C5	۶/۳	۱۷۵
C3, C4	۶/۳	۸۵۰
C8, C11	۰/۴	۲۷۵
C9, C10	۰/۴	۳۲۵
C13, C14	۳	۳۲۵
C17	۲۰	۴۷۵

#### ۳- تعیین نقاط تحلیل

ابتدا ۶ نقطه مختلف در شبکه جهت بررسی و مطالعه پاسخ فرکانسی و آنالیز هارمونیک در نظر گرفته شده است. این نقاط عمدتاً با توجه به نوع بارها و اهمیت پاسخ فرکانسی سیستم و همچنین اعوجاج هارمونیک ولتاژ به ترتیب زیر تعیین شده اند:

**نقطه (۱):** در طرف ۶۳ کیلوولت ترانسفور ماتور پست

**نقطه (۲):** در شین ۲۰ کیلوولت پست ۲۰/۶/۳ کیلوولت

(تغذیه بارهای موتوری بزرگ)

**نقطه (۳):** در شین ۲۰ کیلوولت پست ۲۰/۰/۴ کیلوولت

(تغذیه موتورهای کوچک)

**نقطه (۴):** در شین ۲۰ کیلوولت پست ۲۰/۳/۰/۴ کیلوولت

(تغذیه درایوها و بارهای غیر خطی)

**نقطه (۵):** در شین ۳ کیلوولت پست ۲۰/۳/۰/۴ کیلوولت

(تغذیه درایوها و بارهای غیر خطی)

**نقطه (۶):** در شین ۶/۳ کیلوولت پست ۲۰/۶/۳ کیلوولت

(تغذیه بارهای موتوری بزرگ)

#### ۴- نتایج شبیه سازی

##### ۴-۱- شبیه سازی با استفاده از قابلیت Frequency

##### Scan نرم افزار ATP

در این شبیه سازی ابتدا فرکانس رزنانس سیستم در نقاط تعیین شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه و در جدول (۵) نشان داده شده است.

#### ۴-۲- منابع هارمونیک

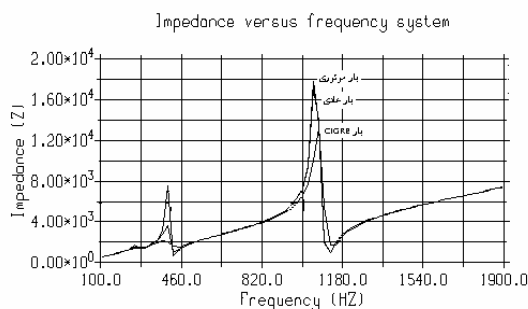
بارهای غیر خطی بصورت منابع جریانهای هارمونیک با دامنه، مرتبه و فاز مشخص مدل شده اند. برای مثال، طیف و اندازه جریانهای هارمونیک یکسو کننده های ۶ پالس موجود در سیستم مورد مطالعه بصورت ضرایبی از مؤلفه اصلی جریان نامی ( $I_h = \frac{I}{h}$ ) تا هارمونیک ۲۵ در نظر گرفته شده اند. مقادیر جریانهای هارمونیک مربوط به یکسو کننده ها بطور خلاصه در جدول (۴) نشان داده شده است. این جریانها از نقاط مختلف (محل اتصال بارهای غیر خطی وارد شبکه شده و در سیستم و شبکه اغتشاشهای هارمونیک ایجاد میکنند که در قسمت شبیه سازی مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

#### جدول (۴): جریانهای هارمونیک یکسو کننده ها

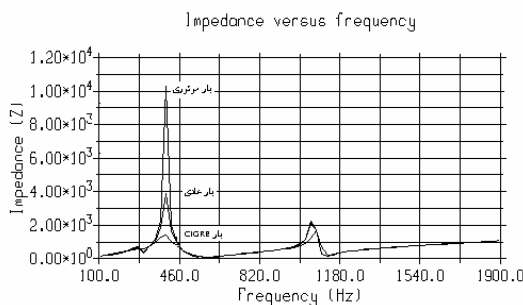
مؤلفه جریان هارمونیک (I <sub>h</sub> )	در سطح ولتاژ ۴۰۰ ولت (A)	در سطح ولتاژ ۳۰۰۰ ولت (A)
I <sub>1</sub>	۲۰۰۴/۷	۳۲۰
I <sub>5</sub>	۴۰۰/۹	۶۴/۱
I <sub>7</sub>	۲۸۶/۳	۴۵/۸



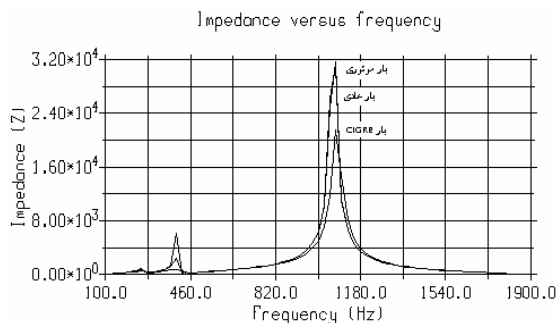
رفتار فرکانسی امپدانس شبکه در نقاط مختلف در فرکانسهای غیر از فرکانس رزونانس در هر سه مدل بار تقریباً مشابه میباشد. با توجه به تفاوت عمده امپدانسها در فرکانس رزونانس میتوان نتیجه گرفت که در آنالیز هارمونیک سیستمهای الکتریکی مدلهای بار نقش بسزایی در نتایج هارمونیک از جمله در فیلتر گذاری خواهد داشت.



شکل (۵): نمودار امپدانس - فرکانس در نقطه (۱)



شکل (۶): نمودار امپدانس - فرکانس در نقطه (۲)



شکل (۷): نمودار امپدانس - فرکانس در نقطه (۳)

$$f_r = f \sqrt{\frac{S_c}{Q_c}} \quad (3)$$

بطوریکه  $f_r$  و  $f$  به ترتیب فرکانس رزونانس و فرکانس نامی سیستم،  $S_c$  قدرت اتصال کوتاه سیستم و  $Q_c$  توان راکتیو بانکهای خازنی در نقاط تعیین شده میباشد.

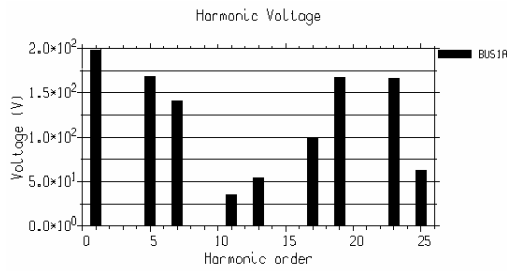
جدول (۵): مقادیر فرکانس رزونانس در نقاط تحلیل

نقطه تعیین شده	قدرت اتصال کوتاه سیستم $S_c$ (MVA)	توان راکتیو بانکهای خازنی $S_c$ (MVar)	فرکانس رزونانس (Hz)
(۱)	۲۰۰۰	۴/۵۵	۱۰۵۰
(۲)	۱۸۴	۲/۵	۴۳۰
(۳)	۴۲۳	۰/۹۲۵	۱۰۶۸
(۴)	۳۲۳	۰/۶۵	۱۱۱۵
(۵)	۳۰۱	۰/۶۵	۱۰۸۰
(۶)	۲۰۰	۲/۵	۳۸۰

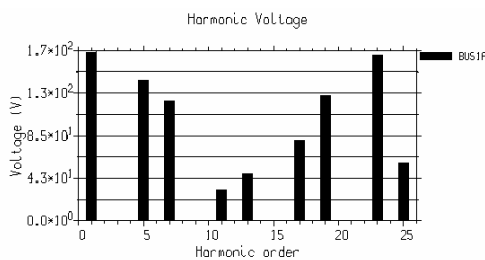
در ادامه امپدانس معادل سیستم با استفاده از قابلیت Frequency Scan نرم افزار ATP در طیف فرکانسی بین ۱۰۰ Hz تا ۱۹۰۰ Hz با توجه به مدل‌های مختلف بار بدست آمده است. شکل‌های (۵) الی (۱۰) بترتیب نتایج شبیه سازی مربوط به امپدانس در نقاط (۱) الی (۶) در هر سه مدل سازی را نشان می دهد. با مقایسه منحنیهای امپدانس - فرکانس سه مدل مختلف بار، مشاهده می شود که رفتار فرکانسی امپدانس شبکه در حالت مدل عادی با مدل موتوری مشابهت بیشتری نسبت به مدل CIGRE دارد.

همچنین فرکانس رزونانس در دو مدل عادی و موتوری تقریباً یکسان و با فرکانس رزونانس در حالت مدل CIGRE اندکی متفاوت می باشد. مطابق نتایج شبیه سازی ها بیشترین مقدار امپدانس سیستم در فرکانس رزونانس در مدل موتوری، و کمترین آن در مدل CIGRE بدست آمده است.

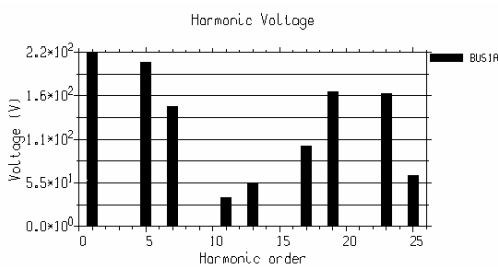
بارهای موجود و با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف بار، اغتشاشات متفاوتی برای ولتاژ شین‌ها حاصل می‌گردد. بعنوان نمونه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی و محاسبه ولتاژ هارمونیک در نقطه (۱) در سه نوع مدل‌سازی بار تا هارمونیک مرتبه ۲۵ در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



الف- مدل بار عادی



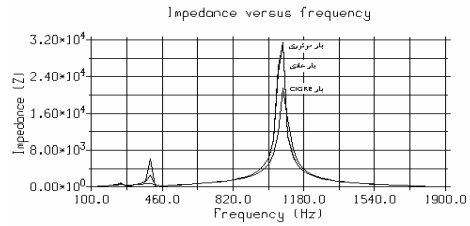
ب- مدل بار CIGRE



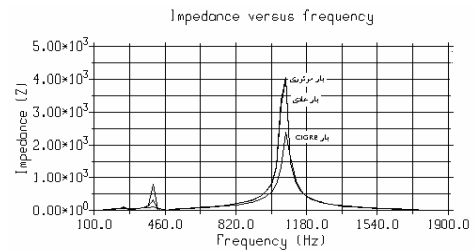
ج- مدل بار موتوری

شکل (۱۱): طیف ولتاژ هارمونیک در نقطه (۱)

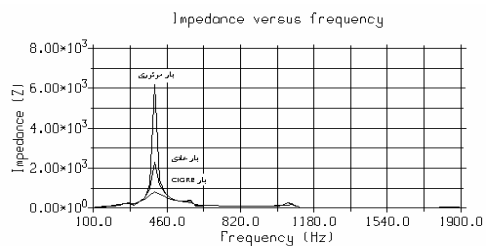
خلاصه نتایج محاسبات هارمونیک مربوط به شین‌های (۱) تا (۶) با توجه به مدل‌های مختلف بار بطور جداگانه در جداول (۶) الی (۱۱) نشان داده شده‌اند. در این جداول مولفه هارمونیک ولتاژ در هر هارمونیک با HF و ضریب اعوجاج کل هارمونیک با THD نشان داده شده است.



شکل (۸): نمودار امپدانس - فرکانس در نقطه (۴)



شکل (۹): نمودار امپدانس - فرکانس در نقطه (۵)



شکل (۱۰): نمودار امپدانس - فرکانس در نقطه (۶)

## ۲-۴- شبیه‌سازی با استفاده از قابلیت H.F.S (Harmonic Frequency Scan)

اکنون که پاسخ‌های فرکانسی سیستم در نقاط مورد نظر بدست آمده است، می‌توان به بررسی مشکلات مربوط به حضور هارمونیک‌ها در سیستم پرداخت. جریان‌های هارمونیک ایجاد شده توسط بارهای غیر خطی از نقاط مختلف وارد شبکه شده و موجب ایجاد ولتاژ هارمونیک (بر اساس رابطه زیر) در هر نقطه از شبکه خواهد شد.

$$[V_h] = [I_h][Z_h] \quad h = 1, 2, \dots, 25 \quad (۴)$$

بطوریکه  $V_h$ ،  $I_h$  و  $Z_h$  به ترتیب ولتاژ، جریان و امپدانس در هارمونیک  $h$  ام می‌باشد.

با توجه به مشخصه‌های امپدانس در نقاط (۱) الی (۶) (شکل‌های ۵ الی ۱۰)، و همچنین جریان‌های هارمونیک ناشی از

**جدول (۶):** نتایج محاسبات هارمونیک مربوط به نقطه (۱)

مدل بار			
موتوری	CIGRE	عادی	مرتبه هارمونیک
HF ( % )			(h)
۰/۵۶	۰/۴۰	۰/۴۶	۵
۰/۴	۰/۳۴	۰/۳۸	۷
۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۹	۱۱
۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۵	۱۳
۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۷	۱۷
۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۴۶	۱۹
۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۶	۲۳
۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۸	۲۵
۰/۷۰۶	۰/۵۶۵	۰/۶۵۵	THD

**جدول (۸):** نتایج محاسبات هارمونیک مربوط به نقطه (۳)

مدل بار			
موتوری	CIGRE	عادی	مرتبه هارمونیک
HF ( % )			(h)
۱/۵۲	۰/۹۵	۱/۲۱	۵
۰/۷۳	۰/۷	۰/۸	۷
۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۴۶	۱۱
۰/۵۸	۰/۵۲	۰/۵۸	۱۳
۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۲۸۸	۱۷
۱/۷۳	۱/۳	۰/۵۰	۱۹
۱/۸۲	۱/۸۲	۱/۸۲	۲۳
۰/۷۲	۰/۷	۰/۷	۲۵
۲/۴۰۸	۲/۰۶۵	۲/۲۸۳	THD

**جدول (۷):** نتایج محاسبات هارمونیک مربوط به نقطه (۲)

مدل بار			
موتوری	CIGRE	عادی	مرتبه هارمونیک
HF ( % )			(h)
۰/۵۳	۰/۲۲	۰/۲۹	۵
۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۲۶	۷
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۱۱
۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۱۳
۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۶	۱۷
۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۱	۱۹
۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۲۳
۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۶	۲۵
۰/۳۴۵	۰/۲۵۰	۰/۲۹۵	THD

**جدول (۹):** نتایج محاسبات هارمونیک مربوط به نقطه (۴)

مدل بار			
موتوری	CIGRE	عادی	مرتبه هارمونیک
HF ( % )			(h)
۱/۵۶	۰/۹۵	۱/۲۶	۵
۰/۸۲	۰/۷۴	۰/۸۱	۷
۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۴۳	۱۱
۰/۷۴	۰/۵۴	۰/۶	۱۳
۱/۰۴۷	۰/۷۸	۱/۰۸	۱۷
۱/۷۳	۱/۳۰	۱/۷۳	۱۹
۱/۸۲	۱/۸۲	۱/۸۲	۲۳
۰/۷۴	۰/۷۱	۰/۷	۲۵
۲/۴۱۱	۲/۰۶۹	۲/۲۸۷	THD

**جدول (۱۰):** نتایج محاسبات هارمونیک مربوط به نقطه (۵)

مدل بار			
مرتبه هارمونیک	عادی	CIGRE	موتوری
(h)	HF (%)		
۵	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۱۰
۷	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۲
۱۱	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۸۷
۱۳	۰/۸۷	۰/۸۲	۰/۸۸
۱۷	۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۹۴
۱۹	۱۰/۱	۰/۸۷	۱۰/۲۸
۲۳	۰/۶۲	۰/۵۴	۰/۶۴
۲۵	۰/۷۳	۰/۶۶	۰/۷۴
THD	۱/۸۱۰	۱/۷۵۶	۱/۸۳۹

**جدول (۱۱):** نتایج محاسبات هارمونیک مربوط به نقطه (۶)

مدل بار			
مرتبه هارمونیک	عادی	CIGRE	موتوری
(h)	HF (%)		
۵	۱/۱۳	۱/۰۷	۱/۳۸
۷	۱/۹۳	۱/۷۳	۲/۱۴
۱۱	۰/۸۵	۰/۶۶	۰/۸۸
۱۳	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۲۸
۱۷	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۲۲
۱۹	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۲۵
۲۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۶
۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۶
THD	۱/۷۶۸	۱/۶۲۸	۱/۹۶۵

بررسی نتایج ارائه شده در جداول ۶ الی ۱۱ نشان میدهد که:

۱- ضریب اعوجاج ولتاژ (THD) در نقاط تعیین شده در هر سه مدل بار خیلی بهم نزدیک بوده و کمتر از مقدار استاندارد

(۵٪) میباشد. وجود خازنهای اصلاح ضریب توان را میتوان بعنوان یکی از علل قابل قبول بودن THD ولتاژ در این نقاط در نظر گرفت.

۲- اعوجاج ولتاژ در هر هارمونیک در مدل‌های مختلف بار، بجز در حوالی فرکانس رزونانس، نیز تقریباً یکسان است. این موضوع با توجه به تغییرات تقریباً یکسان امپدانس - فرکانس در هر سه مدل بار (شکلهای ۵ الی ۱۰) نیز قابل توجیه میباشد.

۳- بیشترین میزان اعوجاج ولتاژ در هر هارمونیک در هر نقطه حوالی فرکانس رزونانس سیستم در آن نقطه ایجاد میشود. برای مثال بیشترین اعوجاج ولتاژ در محل نصب موتورهای بزرگ (نقاط (۲) و (۶)) حوالی هارمونیک هفتم و برای بقیه نقاط حوالی هارمونیک ۲۳ میباشد. این موضوع با توجه به بالا بودن امپدانس سیستم در فرکانس رزونانس در نقاط مختلف (شکلهای ۵ الی ۱۰) نیز قابل دستیابی میباشد.

۴- حداکثر میزان اعوجاج هارمونیک ولتاژ در هر نقطه دقیقاً در فرکانس رزونانس سیستم در آن نقطه رخ خواهد داد. در این حالت امپدانس سیستم در مدل‌های مختلف بار و در نتیجه اعوجاج هارمونیک ولتاژ تفاوت قابل توجهی با یکدیگر خواهند داشت. در شبیه سازی انجام شده بیشترین اعوجاج هارمونیک ولتاژ در هر نقطه و در یک فرکانس مشخص در مدل بار موتوری و کمترین آن مربوط به مدل CIGRE میباشد. لذا میتوان نتیجه گرفت که مدل بار نقش تعیین کننده ای در مشخص کردن پاسخ فرکانسی سیستم و امپدانس آن خصوصاً در شرایط رزونانس داراست. این موضوع در طراحی فیلتر برای حذف هارمونیکهای مزاحم اهمیت ویژه ای خواهد داشت.

۵- میزان اعوجاج ولتاژ محاسبه شده در مدل بار CIGRE در نقاط (۲) و (۶) حدود ۳۰٪ کمتر از مقادیر محاسبه شده با مدل بار موتوری است. لذا مینوان نتیجه گرفت که استفاده از مدل بار CIGRE در شرایطی که بار شبکه از نوع موتوری است مناسب نمیشود.





## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج شبیه سازی روی شبکه یک واحد صنعتی با بارهای موتوری بزرگ، بارهای غیر خطی شامل درایوهای کنترل دور، بارهای موتوری کوچک، بارهای روشنایی و... در سطوح مختلف ولتاژ ارائه شده است. در این مطالعه نرم افزارهای EMTP و ATP جهت شبیه سازی بکار گرفته شده اند. همچنین سه مدل مختلف برای بارها شامل مدل عادی، مدل CIGRE و مدل موتوری انتخاب و در شبیه سازی استفاده شده اند. بعلاوه بارهای غیر خطی بصورت منابع جریان هارمونیکی مدل شده اند.

با شبیه سازی، ابتدا فرکانس رزونانس در ۶ نقطه مختلف شبکه و سپس امپدانس سیستم در آن نقاط در هر سه مدل مختلف بار بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شده اند. در ادامه اعوجاج هارمونیکی ولتاژ ناشی از حضور منابع هارمونیکی در شبکه بدست آمده اند.

نتایج شبیه سازی نشان میدهد که فرکانس رزونانس در دو مدل عادی و موتوری تقریباً یکسان و با فرکانس رزونانس در حالت مدل CIGRE اندکی متفاوت می باشد. همچنین تغییرات امپدانس شبکه در نقاط مختلف در فرکانسهای غیر از فرکانس رزونانس در هر سه مدل بار تقریباً مشابه میباشد. ولی در فرکانس رزونانس، بیشترین مقدار امپدانس سیستم در مدل موتوری، و کمترین آن در مدل CIGRE بدست آمده است. نتایج بدست آمده نشان میدهد که استفاده از مدل CIGRE در نقاطی که بار از نوع موتوری است مناسب نمیشود.

نتایج شبیه سازیها همچنین نشان میدهد که مقدار THD ولتاژ در حوالی فرکانس رزونانس سیستم بالاترین مقدار را داشته و به نوع مدلسازی بار وابسته است. بیشترین مقدار THD ولتاژ مربوط به مدل موتوری و کمترین آن در مدل CIGRE ارزیابی شده است. لذا بطور کلی در آنالیز هارمونیکی سیستمهای الکتریکی مدلهای بار باید با دقت انتخاب شده تا

بیانگر رفتار واقعی بارها در شرایط هارمونیکی باشد. این نکته در طراحی فیلترهای هارمونیکی نیز اهمیت داشته و باید مورد توجه قرار گیرد. برای دستیابی به نتایج دقیقتر شبیه سازیها در سیستم های نامتعادل و با استفاده از مدلهای مختلف عناصر الکترونیک قدرت قابل انجام می باشد.

## ۶- مراجع

- [1]. V. F. Corasaniti, R. Bianchi, F. Viollaz, "Comparison of Load Models in Harmonic Flows," IEE CIRED Conference, June, 2001, pp 2.43.
- [2]. "Harmonic Frequency Scan", EMTP Rule Book, EEUG Meeting, Lamezia, 1999.
- [3]. CIGRE Working Group 36-05, (Disturbing Loads): " Harmonics, Characteristic Parameters, Methodes of Study, Estimates of Existing Values in the Network", Electra, 77, 35-54, 1981.

## ضمیمه:

مشخصات مدل تکفاز بار موتوری (شکل ۴)

$$R_{st} : \text{مقاومت استاتور} \quad R_2(h) = \frac{R_2}{h_s}, \quad R_1(h) = \frac{R_1}{h_s}$$

$$L_1 : \text{اندوکتانس پراکندگی استاتور} \quad h_s = \frac{(h + Slip + Z)}{h}$$

$L_2$ : اندوکتانس پراکندگی روتور منتقل شده به طرف استاتور

$$Z = (-1)^{(h \bmod 3)}$$

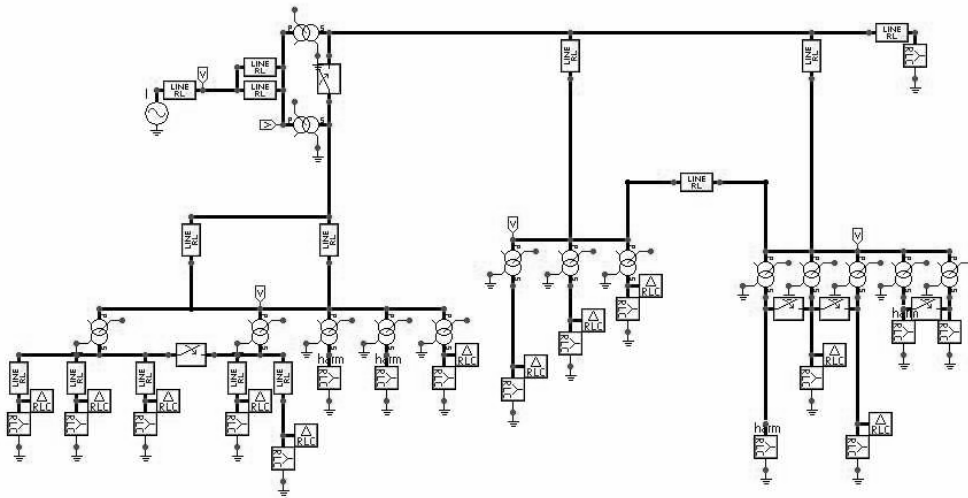
$R_1$ : مقاومت معادل طرف استاتور

$R_2$ : مقاومت معادل روتور منتقل شده به طرف استاتور

$h$ : مرتبه هارمونیکی

$h_s$ : لغزش در هارمونیکی  $h$  ام

Slip: لغزش در فرکانس اصلی



شکل (الف): شماتیک شبکه مورد مطالعه در محیط ATPDRAW

جدول (الف): مشخصات کابلهای زیر زمینی

نام کابل	نوع کابل	سطح مقطع شیلد (mm <sup>2</sup> )	قطر هادی (mm)	ضخامت نوار فولادی (mm)	قطر خارجی تقریبی (mm)	جنس هادی	جریان مجاز	مقاومت DC هادی در 20°C در Ω /km	L (mh/km)	C (μF/km)	طول (km)
							در هادی زمین (A)				
LC1 LC2	×۳۰۰ ۱	۲۵	۲۰/۶	۰/۵	۴۸	مس	۶۴۰	۰/۰۵۰۹	۰/۳۴	۰/۳۲	۱
LC3 LC4 LC5	۱×۳۰	۲۵	۲۰/۶	۰/۵	۴۸	مس	۶۴۰	۰/۰۵۰۹	۰/۳۴	۰/۳۲	۱/۵ ۱/۳ ۰/۵
LC6 LC7 LC7	۳×۵۰	۱۶	۸/۳	۰/۵	۴۷	مس	۱۶۸	۰/۶۴۱	۰/۴	۰/۲۹	۰/۲
LC8 LC9	۳×۹۵	۱۶	۱۱/۶	۰/۵	۵۴	مس	۲۴۵	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۳ ۰/۳

جدول (ب): مشخصات خطوط انتقال

نام خطوط	نوع هادی	تعداد باندها	R+ (Ω)	R0 (Ω)	L+ (mH)	L0 (mH)	C+ (μF)	C0 (μF)	طول خط (km)
L1 , L2	HYENA	۱	۱/۳۵۶	۲/۶۷	۶/۵۲۶	۲۰/۶۱۷	۰/۰۴۴	۰/۰۲۴	۵
L3	HYENA	۱	۰/۵۴۲	۱/۰۷۲	۰/۶۸۸	۲/۲۹۴	۰/۰۲۱	۰/۰۰۹۱	۲

