مطالعه هارمونیک های شبکه

حسین فاریابی دوست * جواد ساعی حمیدرضاقندهاری
"چوکا" "مشانیر"

چکیده

دراین مطالعه ابتدا منابع مختلف تولید هارمونیک در شبکه مورد بررسی قرار گرفته است این منابع تشکیل شده است از تجهیزات سنتی شبکه که از ابتدا وجود داشتداند و در طی زمان سعی درکم کردن مقادیر هارمونیک های تولید شده توسط آنهاشده است . با پیشرفت تکنولوژی نیمه هادیها و کاربرد تایریستورها درسیستم های قدرت و همچنین استفاده از کوره‌های برقی و غیره تولید هارمونیک در شبکه افزایش یافته است . چنانچه ضابطه‌ای از طرف شرکتهای برق منطقه‌ای برای مهار و کنترل کردن این هارمونیک ها برای ارتباط این نوع مشترکین صنعتی به شبکه در نظرگرفته نشود افزایش و تشدید آنها میتواند خساراتی به تجهیزات شبکه وارد آورد. در این مقاله ضمن اشاره به خطرات ایجاد شده توسط هارمونیک ها بویژه درمورد خازنهای جبران کننده روند استاندارد کردن حدود تولید هارمونیک ها توسط مشترکین برق مورد بررسی قرار خواهند گرفت .

---

* مرحوم مهندس فاریابی دوست مدتی پیش دربارد هارمونیک ها بعنوان پروژه فوق لیسانس مشغول مطالعه بودند که متاسفانه اجل مهلتش نداد و به دیار باقی پیوست وکارناتمام ماند. این مقاله چکیده‌ای از این کار ناتمام بوده وآخرین بررسیهای انجام یافته نیزبه آن اضافه شده است. خدایش بیامرزد.

۱- مقدمه

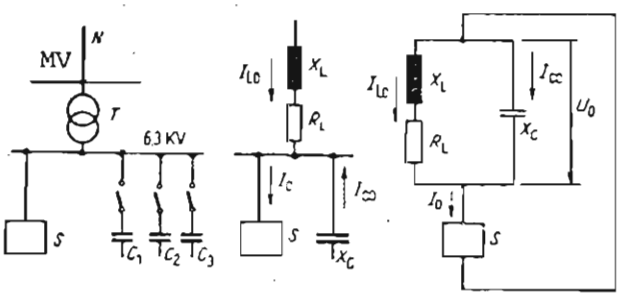
بعضی ازتجهیزات که در سیستم های برق بکار گرفته میشوند بویژه تجهیزات جدیدکه با پیشرفت تکنولوژی نیمه هادیهادرشبکه مورداستفاده قرار گرفتداند ایجاد هارمونیک هایی نموده که در سطوح مختلف شبکه پخش شده و کار تجهیزات شبکه و مصرف کنندگان دیگر را مختل میسازد و باینترتیب کیفیت برق مشترکین را پائین میاورد. از جمله تجهیزاتیکه کارشان در جواراین هارمونیک هامختل میگرددسیستم قطع ووصل ازراه دورمصرف کنندگان بوسیله شرکتهای برق منطقهای "Ripple control" میباشد [۱] که یک نمونه آن در شرکت برق منطقهای تهران موجود است .

منابع تولید هارمونیک ها بقرار زیرند:
ژنراتورهاوالکتروموتورها، ترانسفورماتورها و راکتورها[۲]، یکسوکنندهها و کنترل کنندههائیکه از برش منحنی سینوسی استفاده میکنند [۳]، لامپهای گازی و تلویزیون ، کورههای ذوب فلزات وقوسهای الکتریکی [۴] .

موضوع هارمونیک هامدتهاست که موردبحث و گفتگوی شرکت های تولید کننده برق و مشترکین مربوط بوده و بعلت اهمیت مسئله مجامع بین المللی مثل "IEC" ، "Cigre" و "UNIPEDE" (اتحادیه بین المللی تولید کنندگان وتوزیع کنندگان انرژی الکتریکی) درحال تدوین تعاریف و استانداردهای لازم میباشند. دراین راه سعی میشود خطراتیکه هارمونیک ها برای تجهیزات مورد استفاده درشبکه و همچنین برای مشترکین ایجاد مینماید شناخته شود و اصولی چند برای ارتباط این مشترکین به شبکه مشخص گردد. درهرحال هدف یافتن راههای عملی برای دادن سرویس بهتر به مشترکین میباشد. شرکتهای برق منطقهای باید از طرق محاسباتی و تجزیه و تحلیل مدلها و اندازه گیری مداوم ، سطح این هارمونیک ها را درحد مجاز نگاه دارند. دراین مقاله برای آشنائی ، ابتدائا" طی یک مثال عملی خطراتیکه هارمونیک ها در یک شبکه مشترک صنعتی می تواند ایجاد نماید بحث میشود و سپس معیارها و ضوابط مورد گفتگوی مجامع بین المللی فوق الذکر که میتواندبرای شرکتهای برق منطقهای کشور مانیز مفید باشد ارائه میگردد.

جریان های هارمونیک ها طبق معمول در سطوح مختلف شبکه پخش میشوند. دراینجا باید دقت شود که راکتانس اندوکتیو اجزاء شبکه برای هارمونیک مرتبه n-ام معمولا" n برابر راکتانس اندوکتیو هارمونیک اصلی بوده و راکتانس خازنی اجزاء شبکه 1/n-ام راکتانس خازنی هارمونیک اصلیست . بدینترتیب همیشه این امکان وجود دارد که دریک هارمونیک خاص دو مقدار فوق برابر شده وایجاد تشدید نماید. برای نشان دادن این موضوع خلاصه‌ای از یک مثال عملی‌شرح داده‌میشود.

شکل ۱ مدار تغذیه یک مشترک صنعتی رانشان میدهد که دارای ترانسفورماتوری با راکتانس ۷ درصدبوددوسطح اتصال کوتاه شبکه دراولید ترانسفورماتور ۴۵۰ مگاولت آمپر میباشد. تولیدکننده هارمونیک دراین مداریکسوکننده ۶ پالس‌میباشد



شکل ۱

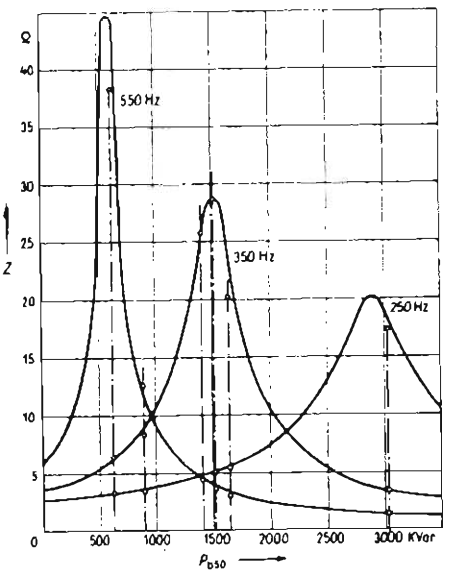
[۵] . این منبع تولید کننده هارمونیک از یک طرف جریانهای خود را به خازنهای اصلاح کننده ضریب قدرت که دارای مقادیر ۶۲۵، ۹۰۰ و ۱۵۰۰ کیلووار است تزریق میکند و از طرف دیگر ترانسفورماتور و شبکه را تغذیه مینماید. بدینترتیب مدار معادلی مطابق شکل ۱ بوجود میاید. درجدول ۱ مقادیر ولتاژ و جریان خازن برای هارمونیک های مختلف و ترکیب بانک خازنی نسبت به نیاز اصلاح کننده قدرت نشان داده شده است .

f [Hz]	250		350		550		650			
kVar	U_o %	I_{Co} A	U_o %	I_{Co} A	U_o %	I_{Co} A	U_o %	I_{Co} A	ΣI_{Co} A	I_{C50} A
0	2,53	0	2,28	0	2,28	0	2,26	0	0	0
625	3,25	8	4,0	13	13,3	85	3,8	29	96	52
900	3,4	13	4,8	26	4,5	37	2,0	20	52	74
1400	4,5	24	14,2	116	1,5	18	0,9	13	120	117
1525	4,85	33	18,1	160	1,2	17	0,8	13	165	123
3025	17,2	217	1,93	34	0,41	11	0,27	9	220	252

جدول ۱

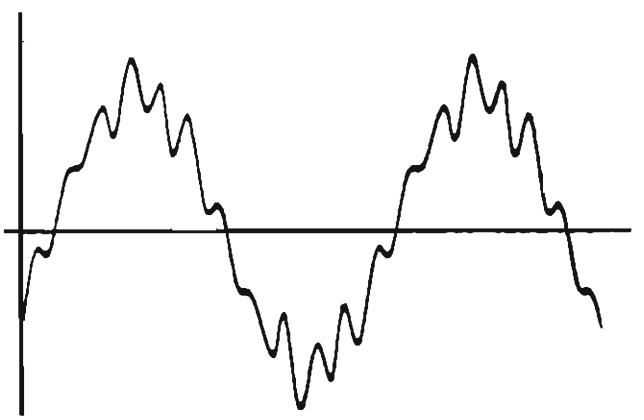
تغییرات امپدانس کل برای ترکیبات مختلف خازن در شکل ۲ نشان داده شده است . لازم به تذکر است که جریان یکسوکننده Io فقط بستگی به مدار جریان مستقیم داشته و با تغییر مدار جریان متناوب ثابت میماند. بدینترتیب

ازدیاد امپدانس کل مطابق شکل ۲ بمعنای اضافه نمودن سهم ولتاژ آن‌هارمونیک میباشد که ایجاد اعوجاج مینمایند. برای مثال هنگام اتصال خازن ۶۲۵کیلووارمنحنی ولتاژبصورت بصورت شکل ۳ تغییر مییابد. لازم‌به‌تذکراست که‌مطابق مدار شکل ۱ جریانهای هارمونیکهای مختلف ازترانسفورماتور نیز عبورنمودوباعث‌تلفات‌اضافی و بالا بردن درجه حرارت آن میشود . مخصوصا" این مسئله با در نظر گرفتن اثر پوستی مقاومتهای اهمی‌تشدیدمیگردد.



شکل ۲

دراین مثال مقاومت اهمی ترانسفورماتوربرای فرکانس اصلی و هارمونیکهای مربوط درجدول شماره ۲ داده شده است . بعلاوه هارمونیک های ولتاژ نیز در هسته ایجاد تلفات اضافی مینماید.



شکل ۳

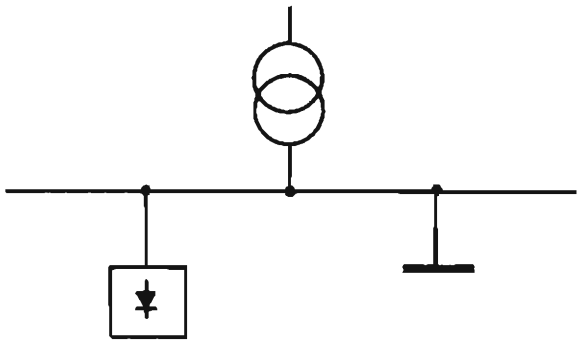
این‌موضوع‌درموردالکتروموتورها وژنراتورهانیزصادق است . در اینجاعلاوه‌برازدیادتلفات مس بعلت اثرپوستی دراستاتور، هارمونیکها ایجاد میدان دوار چندبرابرمیدان‌اصلی‌نموده‌که‌این بنوبه‌خودایجادتلفات اضافی‌در روتورمیکند. بعلاوه‌این میدانها باعث لرزش روتوروخرابی زودرس یاطاقانهاوغیره‌میشود.

چنانچه دراین مثال دیده میشودبرای جلوگیری از بخطرافتادن تجهیزات باید هنگام کاربردخازن دقت ومطالعه کافی بعمل آیدومطابق جدول ۳ نواحی خطر را برای ترکیب های قدرت خازن ، امپدانس ترانسفورماتوروقدرت آن مشخص نمودوحتی الامکان از این نواحی پرهیز کرد.

f	(Hz)	50	250	350	550	650
R_L	(Ω)	0,076	0,35	0,48	0,75	0,83
R_L/R_{L50}	(Ω)	1	4,6	6,3	9,9	10,9

جدول ۲

خطرتشدید درشبکه‌های صنعتی



خطرتشدیدبرای قدرت خازن درواحد [KVAR]

راکتانس ترانسفورماتور قدرت ترانسفورماتور

Transformator	U_k [%]	50	100	150	200	250	300
630KVA	5		11			7	
	6				7		
	7	13	9				
800KVA	5	17	13				7
	6		11	9		7	
	7		11				
1000KVA	5	19	13	11			
	6	17	13		9		
	7	17	11				
1250KVA	5			13	11		9
	6	19				9	
	7	19	13	11			
1600KVA	5		17			11	
	6			13	11		
	7	19					

ازاین قسمتها حتی الامکان پرهیز شود.

اعداد فوق مرتبه هارمونیکها هستند. (n)

جدول ۳

۲- ضوابط و معیارهای تولید و پخش هارمونیک ها درشبکه

ضوابط و چهارچوبهای محدودکننده هارمونیک ها باید واقعیت فنی واقتصادی را که بصورت زیر خلاصه شده است درنظر گیرد.

- درشبکه خواه ناخواه هارمونیک ها وجود دارند که فرکانس ، دامنه ، و زاویه فاز آنها کم وبیش اتفاقی (Random) میباشد.
- کلیه تجهیزات باید بطور صحیح در حضور هارمونیک ها که دامنه آنها کمتر از حدودی هستند که باید بصورت منطقی مشخص شوند عمل نمایند.
- ارتباط شبکه به تجهیزات تولید کننده هارمونیک ها باید درصورتیکه محدودیت های منطقی اعمال شود ممکن باشد.

این محدودیت ها نه تنها مربوط به تولید کنندگان و مصرف کنندگان برق میباشد بلکه سازندگان لوازم و تجهیزات را نیز شامل میشود چه آنها باید دقت نمایند که تجهیزاتی بسازند که نه تنها ایجاد هارمونیک زیاده ازحد ننمایند بلکه درمقابل حدود هارمونیک های مجاز نیز مصون باشند.

این مسائل و معضلات تنها درصورتی گشوده میشود که یک سری شرایط ارتباطی ساده که کاربرد آنها دردنیای واقعیات عملی باشد پیشنهاد گردد. برای اینکار باید تعاریف اولیه برای موضوعات مربوط بصورت زیر بعمل آید:

- حدقابل پذیرش - حد مزاحمت مشخص شدهایست که انتظار میرود دریک سیستم فقط بااحتمال کمی از آن تجاوز شود. این حد چنین انتخاب میشود که برای اکثر تجهیزات سیستم مقبولیت داشته باشد.
- حد مصونیت - ماکزیمم حد مزاحمت بوسیله هارمونیک ها که برروی یک وسیله حادث میگردد و آن وسیله هنوز درحد مورد لزوم بکار خودادامه میدهد.

درحالیکه "حدمصونیت" تجهیزات بوسیله آزمایش مشخص میشود که عملا" باید بیش از "حدقابل پذیرش" باشد، حدقابل پذیرش باید بوسیله شرکتهای برق و یا استانداردها مشخص گردد. برای سطوح ولتاژپائین ومتوسط این کمیت ها بوسیله IEC مشخص شده است درحالیکه برای سطوح ولتاژ بالا مجامع مختلف بین المللی اعدادی تجربی گردآوری کردهاند که خیلی به یکدیگر نزدیک میباشند و بزودی در سطح بین المللی مورد موافقت قرار خواهند گرفت .

این مقادیر درجدول ۴ نشان داده شده است [۶]. لازم به تذکر است که شرکتهای برق نسبت به ساختار سیستم ونوع تجهیزات مربوط و مصونیت آنها در مقابل هارمونیک ها میتوانند مقادیر دیگری انتخاب نمایند.

هارمونیکهای زوج			هارمونیکهای فرد مضرب ۳			هارمونیکهای فرد غیرمضرب ۳		
مرتبه هارمونیک	درصدولتاژ هارمونیک		مرتبه هارمونیک	درصدولتاژ هارمونیک		مرتبه هارمونیک	درصدولتاژ هارمونیک	
n	HV	LV/MV	n	HV	LV/MV	n	HV	LV/MV
2	1.5	2	3	2	5	5	2	6
4	1	1	9	1	1.5	7	2	5
6	0.5	0.5	15	0.3	0.3	11	1.5	3.5
8	0.2	0.5	21	0.2	0.2	13	1.5	3
10	0.2	0.5	>21	0.2	0.2	17	1	2
12	0.2	0.2				19	1	1.5
>12	0.2	0.2				23	0.7	1.5
						25	0.7	1.5
جمع هارمونیکها برای 3% : HV جمع هارمونیکها برای 8% : LV/MV						>25	$0.1+\frac{2.5}{n}$	$0.2+\frac{12.5}{n}$

جدول ۴

۴- جمع هارمونیک های ولتاژ

منتجه هارمونیک های ولتاژ برای هریک از هارمونیک ها در هرنقطه سیستم از جمع برداری آن هارمونیک بدست میاید. مطالعات نشان داده است که رابطه زیر رامیتوان بکار برد [۷].

$$U_{nr} = K\,(U_{n1}^{a} + U_{n2}^{a} + \dots\dots)^{1/a} \qquad (۱)$$

که در آن

U_{nr} = هارمونیک منتجه مرتبه n-ام

K,a = مقادیر ثابت

U_{ni} = هارمونیک مرتبه n-أم از "تولید کننده" i-ام

چنانچه زیر سیستمی به سطوح ولتاژ بالاتر و پائینتر متصل باشد هارمونیک از این سطوح عبور کرده و بنابراین سهمی دربالابردن هارمونیک های آن زیرسیستم مطابق روابط زیر خواهندداشت

$$[G_{nu}^{a} + (T_{nsu}\,G_{ns})^{a}]^{1/a} = C_{nu}$$
$$[G_{ns}^{a} + (T_{nus}\,G_{nu})^{a}]^{1/a} = C_{ns} \qquad (۲)$$

که در آن :

G_{ns} = سهم ماکزیمم "تولیدکنندگان" هارمونیک مرتبه n-ام درزیرسیستم

G_{nu} = سهم ماکزیمم "تولیدکنندگان" هارمونیک مرتبه n-ام که به سطح ولتاژ بالاتروارد میشود

C_{ns} = حد قابل پذیرش "تولیدکنندگان" هارمونیک مرتبه n-ام درزیرسیستم

C_{nu} = حد قابل پذیرش "تولیدکنندگان" هارمونیک مرتبه n-ام درسطح ولتاژ بالاتر

T_{nus} = ضریب انتقال "تولیدکنندگان" هارمونیک مرتبه n-ام از سطح ولتاژ بالا به زیرسیستم

T_{nsu} = ضریب انتقال "تولیدکنندگان" هارمونیک مرتبه n-ام از زیر سیستم به سطح ولتاژ بالاتر

مقادیر a و k نسبت به درصد احتمالیکه برای عدم تجاوز هارمونیک منتجه انتخاب شده و همچنین دامنه و زاویه هارمونیک ها مشخص میشوند . مقادیر پیشنهاد شده با درنظرگرفتن وضعیت خاص شبکه‌های قدرت بصورت زیر بدست آمده است :

برای	$n = ۳،۵،۷$	و	$k = ۱$	$a = ۱$
برای	$n = ۱۱،۱۳$	و	$k = ۱$	$a = ۱.۴$
برای	$n > ۱۳$	و	$k = ۱$	$a = ۲$

باداشتن ضریب انتقال T " حدقابل پذیرش " زیرسیستم مشخص میگردد.
ضریب انتقال T بستگی به فاکتورهای زیادی دارد از جمله توپولوژی . بارها و خازنهای شبکه . روشی پیشنهاد شده است [۸] که بوسیله آن حتی دریک سیستم بغرنج میتوان ضرائب T را محاسبه نمود. درواقع تعیین ضرائب T از وظایف شرکتهای برق منطقه‌ای میباشد.

۵- حدود تولید هارمونیک ها بوسیله مشترکین

برای هرمشترک فقط جزئی ازماکزیمم تولیدکنندگان هارمونیک درزیرسیستم (G) مجاز میباشد. یک پیشنهاد منطقی میتواند نسبت قدرت آن مشترک (P_i) به قدرت کل آن زیرسیستم (P_t) باشد. بادرنظرگرفتن این موضوع و استفاده از روابط فوق عبارت زیر حاصل میشود.

$$E_{ni} = G_{ns} \left(\frac{P_i}{P_t}\right)^{1/a} \qquad (۳)$$

که در آن :

E_{ni} = حدتولید قابل پذیرش هارمونیک ولتاژ مرتبه n-ام برای مشترک i-ام میباشد. درروابط فوق هارمونیک ولتاژ مورد محاسبه قرار گرفته است . برای تعیین هارمونیک جریانها میتوان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$I_{ni} = E_{ni} / Z_n \qquad (۴)$$

که درآن Z_n امپدانس وابسته به فرکانس شبکه میباشد که باید بوسیله شرکتهای برق منطقه‌ای مشخص گردد.

۶- تعیین عملی حدود تولید هارمونیک ها بوسیله مشترکین

درعمل برای مشخص کردن حدود تولید هارمونیکها بوسیله مشترکین و تجهیزات مربوط، آنان را به سه بخش بصورت زیر تقسیم مینمائیم .

۶-۱- بخش اول - مشترکین و مصرف کنندگان کوچکتر

این بخش مربوط میشود به تجهیزات نوع کوچکتر که مورد استفاده عمومی بوده و پذیرش آن بصورت اتوماتیک مجاز میباشد. این بدان معناست که پذیرش " حد تولید هارمونیک " آنها وابسته به محاسبات فوق نمیباشد (بعضی از کارشناسان دربرخی از کشورها عقیده دارند که حداقل سطح اتصال کوتاه نقطه ارتباط باید دخالت داشته باشد).
بدینترتیب دراین بخش تصمیم گیری برای مصرف کنندد و شرکتهای برق منطقه‌ای خیلی راحت میباشد. این بخش همچنین میتواند سازندگان را برای طراحی و تولید انبوه تجهیزات کمک نماید. درحال حاضر هرکشور برای خود ضابطه‌ای مشخص کرده است ولی یک توصید بین المللی باید کمک نماید تا حدود این بخش مشخص گردد.

۶-۲- بخش دوم - مشترکین و مصرف کنندگان بزرگ

چنانچه تولید هارمونیک ها بوسیله مصرف کنندگان بخش اول از حدود خود تجاوز نمودند دربخش دوم بادرنظر گرفتن رابطه (۳) سهم تولید ماکزیمم این نوع مشترکین محاسبه میگردد. این نوع مشترکین معمولا" صنعتی بوده و درسطح ولتاژ بالاتر به شبکه متصل میشوند.

۶-۳- بخش سوم - مشترکین و " تولید کنندگان هارمونیک " افزون از حد

اعمال محدودیت دردو بخش قبلی و نظر به اینکه برخی از مشترکین کوچک و بزرگ تاحد تعیین شده و یا محاسبه شده تولید هارمونیک نمی نمایند دست شرکتهای برق منطقه‌ای باز گذارده شده است تا بتوانند از حاشیه موجود برای مشترکین و تولید کنندگان هارمونیک - افزون ازحدبخش دو- استفاده نمایند.
درهرحال پذیرش این‌نوع‌مشترکین‌بایدبررسی‌وفقط درحالات استثناء انجام گیرد.

۷- نتیجه گیری

سطح هارمونیک ها درشبکه‌های توزیع مخصوصا" باکاربرد بارهائیکه ذاتا" تولید هارمونیک مینماید بطور روزافزونی اهمیت پیدا میکند. مهندسین شرکت های برق منطقه‌ای اجبارا" باید علاوه بر شناخت تکنیکهای تجزیه و تحلیل با روشهای اندازه گیری هارمونیک ها نیز آشناشوند. چه روشهای محاسباتی و برنامه‌های کامپیوتری برای تعیین سطح هارمونیک ها محدود میشود به هنگامیکه تولید کنندگان هارمونیک ها مشخص باشند. اندازه‌گیری واقعی هارمونیک ها لازم است تا سطح هارمونیک های زمینه را بدست آورده و بعلاوه درستی مدلهای محاسباتی را باثبات برساند. دراین مقایسه میتوان مانورهای مختلفی از قبیل برقدار کردن خازنها و یاخطوط مختلف را اعمال نمود و مقادیر هارمونیک ها رادرنزدیکی محل تولید آنها و یادور از آنها محاسبه واندازه گیری نمود. دانشگاهها و مراکز تحقیقاتی قادرند کمک زیادی در تعیین روشها دراین رابطه بنمایند. شرکتهای برق منطقه میتوانند با حمایت این نوع مطالعات چارچوبها را مشخص کرده و نظارت و کنترل دائم خود را بر تولید هارمونیک ها اعمال نمایند تا کیفیت ارائه خدمات به مشترکین خود را اعتلاء بخشند.

قدردانی

ازمدیریت و همکاران شرکت مشانیر که امکانات مورد لزوم را جهت تهیه این مقاله در اختیار قرارداده‌اند سپاسگزاری میشود.

فهرست مراجع

[۱] - " راههای مقابله با کمبودبرق و خاموشیها" . جواد ساعی . سمینار بانک صنعت و معدن ایران . ۲۲ و ۲۳ اردیبهشت ۱۳۶۹

[۲] - مطالب تهیه شده در ارتباط با هارمونیک ها جهت پایان نامه فوق لیسانس توسط مرحوم فاریابی دوست

[۳] - " هارمونیک ها درشبکه قدرت " سمینار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف ، جواد ساعی ، ۱۳۵۶

[۴] - "oberschwingungen in Industrienetzen mit Stromrichter-belastung", Werner Schulz, ET2-B, Bd 23 (1971) H.12

[۵] - "Leistungs factor verbesserung durch Kondensatorn und Saugkreise in Industriewerken mit Stromrichteranlagen", Hermann Geisse, AEG-Mitteilungen 48, 1958

[۶] - "Equipment producing harmonics and conditions governing their connection to the mains power supply", WG Cigre 36.05 Electra No. 123, March 1989

[۷] - "Harmonics summation effects. Summation of randomly varying vectors". Crucq J.M., Robert A., Laborelec, Report 1-JMC-AR/1310/8702, January 15, 1987

[۸] - "Prediction of harmonic voltage distortion due to different categories of non-linear loads supplied by the electric network", Lagostena L., Porrino A., Lionetto P.F., Cogre 1986, Paper 36-11.