

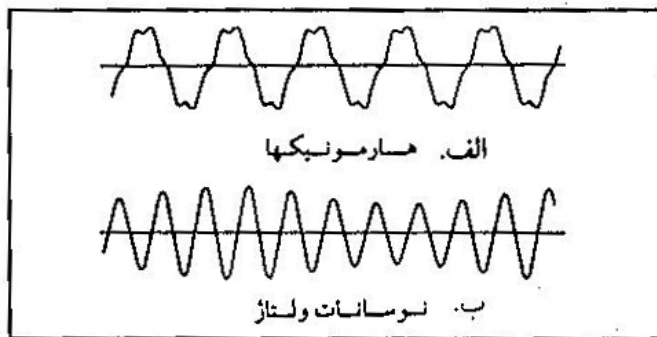
ارزیابی فیلکر ناشی از کارخانه فولاد آلیاژی ایران واقع در استان یزد

قسمت اول: مفاهیم اولیه و استانداردها

مقدمه

نوسان ولتاژ یکی از عمده‌ترین مسائل مطرح در زمینه «کیفیت توان» می‌باشد که تأثیر آن بر لامپ‌های روشنایی باعث ایجاد پدیده‌ای موسوم به فیلکر می‌گردد. این پدیده یک احساس فردی از کم و زیاد شدن میزان روشنایی است. از اثرات مضر این پدیده می‌توان به آزردهی چشم و ایجاد اغتشاش در کارکرد تجهیزات الکتریکی اشاره کرد. قسمت اول این پروژه به تشریح پدیده فیلکر و مفاهیم کلیدی مربوط به اندازه‌گیری و ارزیابی شدت آن می‌پردازد. در انتها، معیارها و استانداردهای جدید مرتبط با موضوع فیلکر مرور خواهد شد.

معیار «کیفیت توان» متأثر از انواع گوناگونی از اغتشاش می‌باشد که از آن میان می‌توان به دو مورد عمده‌تر هارمونیک‌ها و نوسانات ولتاژ اشاره کرد. پدید آمدن هر یک از دو مورد یاد شده مطابق شکل (1) به نوعی باعث ایجاد اعوجاج در شکل موج مؤلفه اصلی ولتاژ یا جریان خواهد شد. هارمونیک‌ها متناظر با اعوجاج‌های با فرکانس بزرگتر از مؤلفه اصلی و نوسانات ولتاژ متناظر با اعوجاج‌های با فرکانس کوچکتر از مؤلفه اصلی می‌باشند.

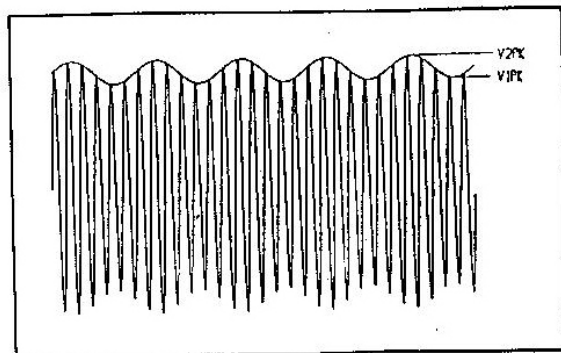


شکل (1) دو نمونه از عمده‌ترین اغتشاشات الکترومغناطیسی با مؤلفه‌هایی با فرکانس الف: بزرگتر

از مؤلفه اصلی، ب: کوچکتر از مؤلفه اصلی.

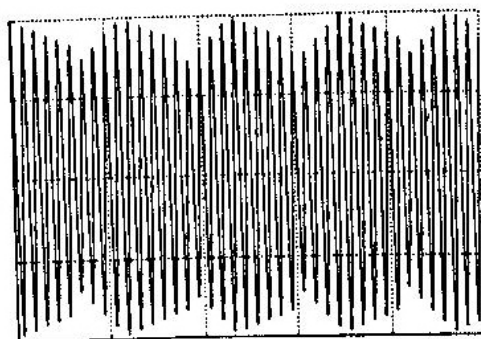
کارکرد بعضی از بارهای غیرخطی مثل مبدل‌ها، کوره‌های القایی و منابع تغذیه با تولید هارمونیک‌ها باعث می‌گردند که علاوه بر شکل موج مؤلفه اصلی (مؤلفه 50 یا 60 هرتز)، مؤلفه‌های دیگری اما با فرکانس‌هایی بیش از فرکانس مؤلفه اصلی ظاهر شوند. راه‌اندازی موتورهای بزرگ یا کارکرد انواع دیگری از بارها نظیر دستگاه‌های جوش و کوره‌های قوس الکتریکی با تغییراتی که در مقدار مؤثر ولتاژ

ایجاد می‌کنند و به آن اصطلاحاً «فیلکر ولتاژ» اطلاق می‌گردد، به گونه‌ی دیگری نیز می‌توانند باعث ایجاد اعوجاج شوند. برای توضیح این مطلب می‌توان قطع و وصل متناوب یک موتور را در نظر گرفت که باعث می‌گردد شکل موج ولتاژ تغذیه، شبیه آنچه در شکل (2) نمایش داده شده، گردد.



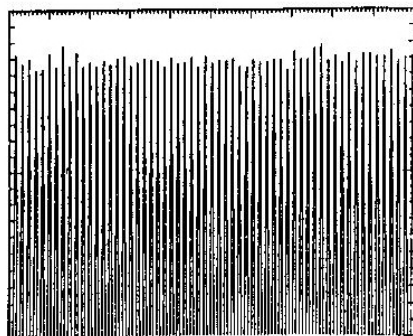
شکل (2) شکل موج سینوسی فیلکر

همان‌گونه در شکل (2) مشاهده می‌شود، تأثیر راه‌اندازی موتور به گونه‌ای است که گویی شکل موج اصلی توسط یک شکل موج جدید مدوله شده است. این شکل موج مدوله‌کننده، اصطلاحاً شکل موج فیلکر خوانده می‌شود که دارای فرکانسی کوچکتر از فرکانس مؤلفه اصلی می‌باشد. بدیهی است راه‌اندازی منظم یک موتور الکتریکی باعث می‌شود که شکل موج فیلکر شبیه آنچه در شکل (2) نشان داده شده سینوسی محض باشد و راه‌اندازی نامنظم یک موتور الکتریکی، شروع به کار یک دستگاه جوش و یا فعالیت بارهای نامنظم و کاملاً غیرقابل پیش‌بینی مثل کوره‌های قوس الکتریکی، باعث می‌گردد که شکل موج فیلکر مطابق شکل‌های (3) و (4) غیرسینوسی و یا حتی نامتناوب شود. در هر صورت مؤلفه‌های فرکانسی موجود در شکل موج فیلکر کوچکتر از فرکانس مؤلفه اصلی خواهد بود (معمولاً کمتر از 30 هرتز).



شکل (3) شکل موج غیرسینوسی فیلکر (پوش منحنی)

از اثرات مضر نوسانات ولتاژ ایجاد شده در حالت‌های گذرا که یا عمدتاً بر اثر راه‌اندازی تجهیزات خاص موجود در کارخانجات و کارگاهها به وجود می‌آیند و یا بر اثر اشکالات و خطاهای گذرا در شبکه، کم و زیاد شدن یا سوسو زدن نور لامپ‌های روشنایی می‌باشد. این پدیده «فیلکر» نام گرفته است و گر چه یک پدیده فیزیولوژیکی ناشی از نوسانات ولتاژ می‌باشد و اساساً مفاهیم فیلکر و نوسان ولتاژ طبیعت یکسانی ندارند اما در بعضی از موارد برای انتقال آسانتر مطلب، این دو مفهوم معادل هم به کار می‌روند. فیلکر یک احساس فردی از کم و زیاد شدن میزان روشنایی است و ممکن است از فردی به فرد دیگر تغییر کند، به این معنی که یک فیلکر ولتاژ مشخص، ممکن است در نظر تمامی افراد، آزاردهنده و یا برعکس، غیرقابل درک تشخیص داده نشود. درک افراد از این پدیده، به دامنه و فرکانس نوسانات ولتاژ، نوع لامپ‌های مورد استفاده، میزان روشنایی مورد نیاز و تجربه شخصی فیلکر بستگی دارد.



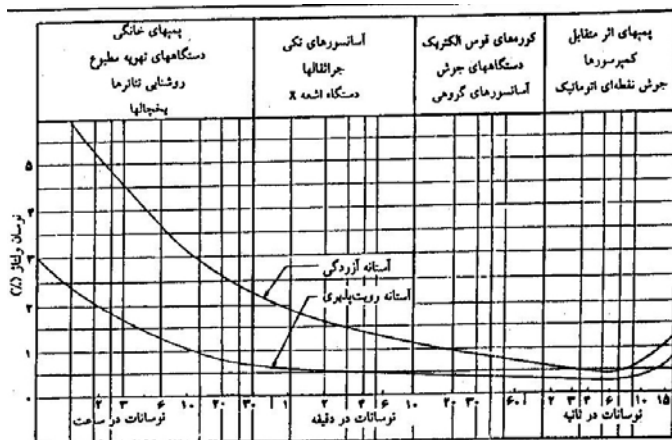
شکل (4) شکل موج نامتناوب فیلکر (پوش منحنی)

اهمیت توجه به پدیده فیلکر از دو جنبه آشکار می‌شود. جنبه اول آنکه مقادیر غیرمجاز آن باعث آزرده‌گی چشم می‌شود و موجبات نارضایتی مشترکین را فراهم می‌کند و جنبه دوم آنکه به طور کلی کیفیت ولتاژ شبکه را کاهش داده و بارهای حساس از قبیل کامپیوترها و دیگر تجهیزات الکترونیکی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. در واقع، محتوای طیفی این نوع اعوجاج می‌تواند کارکرد بارهایی را که به فرکانس حساس هستند و در نزدیکی بارهای مولد اعوجاج قرار دارند با مشکل مواجه کند.

ارزیابی فیلکر

بر اساس روش‌های قدیمی، ارزیابی فیلکر مستلزم در اختیار داشتن دو پارامتر عمده می‌باشد. پارامتر اول، درصد نوسان ولتاژ یا درصد فیلکر ولتاژ $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)\%$ و پارامتر دوم، فرکانس یا فرکانس‌های وقوع نوسانات ولتاژ می‌باشد. این دو پارامتر را یا از طریق اندازه‌گیری و یا بر اساس اطلاعاتی که از مشخصات بار و وضعیت کارکرد آن در دسترس هست، می‌توان به دست آورد. با در اختیار داشتن

این دو پارامتر، می‌توان به منحنی‌های مشخصه حساسیت فیلکر مراجعه کرد و دربارهٔ میزان قابل احساس بودن یا آزاردهنده بودن فیلکر ایجاد شده قضاوت نمود. در شکل (5) نمونه‌ای از این منحنی‌ها که در سال 1934 میلادی توسط شرکت جنرال الکتریک تهیه شده، مشاهده می‌شود.



شکل (5) یک نمونه از منحنی‌های مشخصه حساسیت فیلکر که در سال 1934 توسط شرکت جنرال الکتریک تهیه شده است.

در قسمت بالای این منحنی، بعضی از بارهای نمونه‌ای که در محدودهٔ تعیین شده، معمولاً باعث ایجاد فیلکر می‌گردند، مشخص شده‌اند. همانطور که از شکل پیداست، صرفنظر از نوع بار، به ازای تعداد مشخصی نوسان ولتاژ در مدت زمان مشخص و یا به عبارت دیگر در یک فرکانس نوسانات مشخص، اگر درصد نوسانات ولتاژ از یک حد کمتر باشد، فیلکر اصلاً تشخیص داده نمی‌شود، در یک محدودهٔ خاص تشخیص داده شده ولی آزاردهنده نیست و اگر از یک حدی بیشتر گردد، آزاردهنده خواهد بود. از طرف دیگر، به ازای یک مقدار مشخص از درصد نوسانات ولتاژ، با تغییر فرکانس نوسانات، فیلکر می‌تواند غیرقابل احساس، قابل احساس و یا آزاردهنده شود. این منحنی همچنین نشان می‌دهد که اگر فرکانس نوسانات ولتاژ در حدود 8 هرتز باشد، به کمترین مقدار درصد نوسان ولتاژ، فیلکر قابل احساس یا آزاردهنده می‌شود.

درصد نوسان ولتاژ که در بعضی موارد از آن به‌عنوان دامنه یا سطح فیلکر یاد می‌شود، به طور کلی به صورت نسبت تغییر مقدار مؤثر ولتاژ (مقدار مؤثر شکل موج مدوله‌کننده) به میانگین مقدار «ولتاژ مؤثر» تعریف می‌شود. فرض می‌شود در یک فاصلهٔ زمانی مشخص، به دلیل کارکرد یک بار خاص، مثلاً راه‌اندازی متناوب یک موتور، یک فیلکر دوره‌ای (سینوسی) شبیه آنچه در شکل (2) نشان داده شده تولید شود.

در این فاصله زمانی، می‌توان یک مقدار متوسط برای ولتاژ مؤثر تعریف کرد. مفهوم درصد فیلکر ولتاژ این است که مقدار مؤثر ولتاژ تغذیه نسبت به این مقدار متوسط، چند درصد تغییر کرده است. در ادامه، بیان ریاضی مفاهیم فوق برای فیلکر نشان داده شده در شکل (2) ارائه می‌گردد.

با توجه به شکل (2)، تغییر مقدار مؤثر ولتاژ یا به بیان معادل، مقدار مؤثر شکل موج مدوله‌کننده برابر است با:

$$V_1 = \frac{\Delta V}{2\sqrt{2}} = \frac{V_{2PK} - V_{1PK}}{2\sqrt{2}} \quad (1)$$

مقدار متوسط ولتاژ نیز برابر است با:

$$V_2 = \frac{V_{2PK} / \sqrt{2}}{2} + \frac{V_{1PK} / \sqrt{2}}{2} \quad (2)$$

بر این اساس، درصد فیلکر ولتاژ به صورت معادله (3) به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = \frac{V_1}{V_2} \times 100 = \frac{V_{2PK} - V_{1PK}}{V_{2PK} + V_{1PK}} \times 100 \quad (3)$$

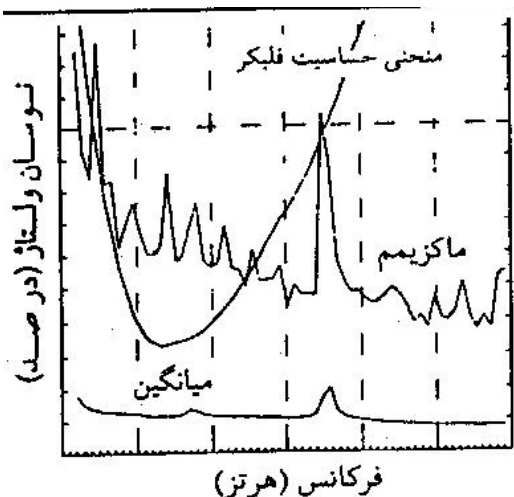
در حالتی که فیلکر غیردوره‌ای باشد، به این معنی که شکل موج فیلکر یا موج مدوله‌کننده، غیرسینوسی شود، بر اساس تحلیل فوریه، مؤلفه‌های فرکانسی شکل موج فیلکر استخراج می‌شود و در واقع مقدار عددی $\frac{\Delta V}{V}$ نه فقط برای مؤلفه اصلی، بلکه برای تمامی مؤلفه‌های موجود در شکل موج غیرسینوسی محاسبه می‌گردد. یک روش ارزیابی فیلکر بر همین اساس استوار شده است. با توجه به مقادیر متعدد $\frac{\Delta V}{V} \%$ که در مدت زمان مشاهده در هر فرکانس به دست آمده، مقادیر بیشینه و میانگین مشخص شده و در نهایت، دو منحنی یکی مربوط به بیشترین مقادیر $\frac{\Delta V}{V} \%$ در هر فرکانس و دیگری مربوط به میانگین این مقادیر به دست می‌آید. این منحنی‌های به دست آمده، در مرحله بعد می‌توانند با منحنی مشخصه حساسیت فیلکر مورد استفاده قرار گیرند. این مقایسه، معیار ارزیابی و تا حدودی مشخص‌کننده میزان آزار دهندگی فیلکر خواهد بود. شکل (6) طرحی از این روش را نمایش می‌دهد.

درصد فیلکر ولتاژ را بر اساس روابط محاسباتی دیگری نیز که مستقیماً با مشخصات بار ارتباط دارند، می‌توان به دست آورد. روش اتصال کوتاه، نمونه‌ای از این روشهاست. اگر S_{re} کل توان ظاهری مورد نیاز شبکه (شامل امپدانس بار و منبع) و S_{sc} توان اتصال کوتاه در نقطه‌ای از شبکه باشد که درصد فیلکر ولتاژ در آن نقطه محاسبه می‌گردد، می‌توان نشان داد.

$$\frac{\Delta V}{V} \% = \frac{S_{re}}{S_{sc}} \times 100 \quad (4)$$

اگر S_{re} صرفاً توان مورد نیاز بار در نظر گرفته شود، درصد فیلکر ولتاژ را به تقریب می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = \frac{S_{re}}{S_{re} + S_{sc}} \times 100 \quad (5)$$



شکل (6) منحنی‌های بیشینه و میانگین درصد نوسان ولتاژ در فرکانس‌های مختلف به همراه منحنی مشخصه حساسیت فیلکر

در حالت کلی وقتی اطلاعاتی از بار در دسترس نباشد، اطلاعاتی که در مشخصات نامی بار آمده، می‌تواند به عنوان مقادیر پایه به کار رود. البته چون هدف، بررسی اثرات راه‌اندازی و شروع به کار بارهای مولد فیلکر می‌باشد، S_{re} در روابط (4) و (5)، توان مورد نیاز بار در لحظات راه‌اندازی و شروع به کار آن می‌باشد. پس در حالت کلی با داشتن توان ظاهری لحظه راه‌اندازی بار و توان اتصال کوتاه محل اتصال بار به شبکه، می‌توان درصد فیلکر ولتاژ را در شینه بار از روابط (4) و (5) به دست آورد و با داشتن فرکانس نوسانات و استفاده از منحنی حساسیت فیلکر، مقدار فیلکر ولتاژ را نسبت به حدود مجاز مشخص نمود. برای بارهای موتوری (القایی)، دستگاه‌های جوش و کوره‌های القایی، روابطی وجود دارد که بر اساس آنها می‌توان مقادیر تقریبی S_{re} را با استفاده از مقادیر نامی آنها به دست آورد.

بررسی اثر جمعی بارهای اغتشاشی

مطالب ارائه شده صرفاً برای ارزیابی نوسان ولتاژ ناشی از تنها یک بار اغتشاشی بود. بررسی این موضوع، به خصوص در حالتی که مجموعه‌ای از بارهای اغتشاشی در حال فعالیت باشند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه بیشترین اثر فیلکر در فرکانس‌های حدود 8 هرتز احساس می‌شود، مطلوب خواهد بود اگر دامنه نوسانات ولتاژ با فرکانس‌های مختلف را منحصراً در فرکانس 8 هرتز در اختیار داشته باشیم. برای همین منظور منحنی ویژه‌ای موسوم به منحنی ضریب تصحیح $(g(f))$ وجود دارد که به کمک آنها صرفاً با داشتن فرکانس نوسانات ولتاژ ایجاد شده، می‌توان ضریب

تصحیح مناسب را استخراج کرد و با ضرب آن در دامنه نوسان ولتاژ، دامنه معادل آن در فرکانس 8 هرتز یا هر فرکانس دلخواه دیگری به دست آورد. به عبارت دیگر یک نوسان ولتاژ با فرکانس f و دامنه a_f ، از نظر احساس فیلتر همان تأثیر یک نوسان ولتاژ 8 هرتزی با دامنه $a_{8Hz} = g(f) \cdot a_f$ را داراست که در این رابطه $g(f=8)=1$ و $g(f \neq 8) < 1$ می باشد. در شکل (7) منحنی ضریب تصحیح $g(f)$ به همراه سطوح مشخص کننده فیلتر نشان داده شده است.

به عنوان مثال برای یک موتور با 5 استارت در روز، ضریب تصحیح معادل با 0.067 به دست می آید و اگر درصد نوسان ولتاژ مربوط 1.48 باشد، می توان فهمید که درصد نوسان ولتاژ ناشی از کارکرد این موتور معادل با $1.48 \times 0.067 = 0.099$ در فرکانس 8 هرتز خواهد بود. به عبارت دیگر اثر اغتشاشی این موتور معادل یک فیلتر ولتاژ 0.099 درصدی با فرکانس 8 هرتز است.

بعد از آنکه درصد فیلتر ولتاژ معادل کلیه بارهای اغتشاشی معلوم شد، با استفاده از رابطه (6) می توان تأثیر معادل کلیه بارهای اغتشاشی را به دست آورد:

$$A_{eq8Hz} = \left[\sum A_i^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

در این رابطه، A_i درصد فیلتر ولتاژ معادل 8 هرتزی مربوط به هر یک از بارها می باشد. به عنوان نمونه، مجموعه ای را مرکب از سه بار اغتشاشی که در نزدیکی هم قرار گرفته و مشخصات آنها در جدول (1) ارائه شده در نظر می گیریم.

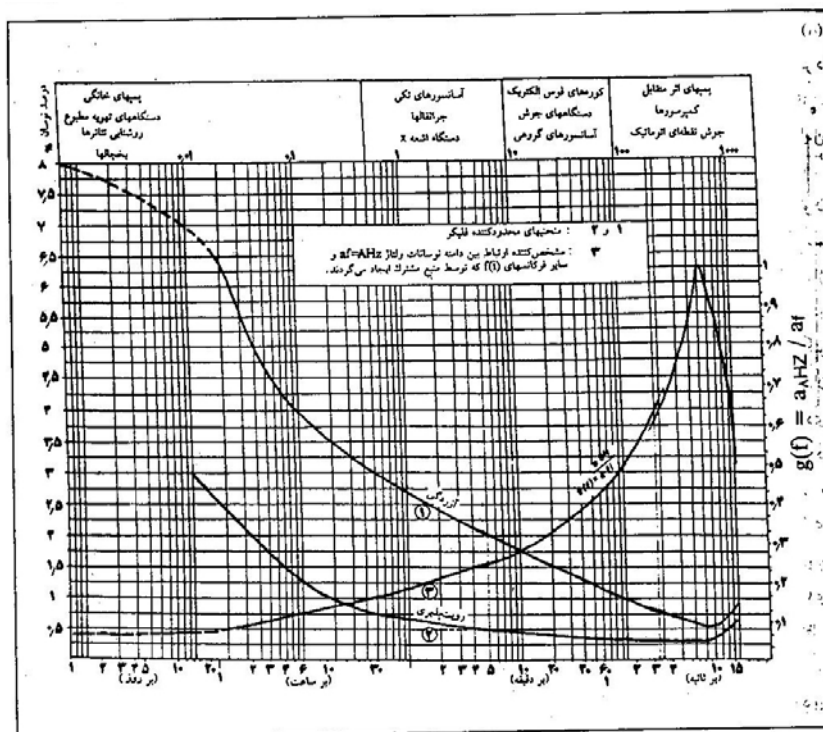
جدول (1) مشخصات نوسان ولتاژ ناشی از سه بار اغتشاشی

نوع بار اغتشاشی	فرکانس نوسانات	دامنه نوسان ولتاژ
دستگاه جوش	دقیقه 10/	%1
موتور 1	روز / 5	%5
موتور 2	ساعت / 1	%3

با توجه به فرکانس نوسانات ایجاد شده، ضرایب تصحیح به ترتیب معادل با 0.28، 0.067 و 0.074 به دست می آید. درصد فیلتر ولتاژ معادل 8 هرتزی این مجموعه، از رابطه (6) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$A_{eq8Hz} = \left[(0.28 \times \%1)^2 + (0.067 \times \%5)^2 + (0.074 \times \%3)^2 \right]^{1/2} = 0.49\%$$

اگر منحنی مشخصه حساسیت فیلتر شکل (7) ملاک قرار گیرد، با درصد فیلتر ولتاژ 0.49 و فرکانس 8 هرتز، فیلتر ولتاژ نهایی در نزدیکی ناحیه آزار قرار می گیرد.



شکل (7) منحنی‌های مشخص‌کننده حدود رؤیت‌پذیری و آزار فیلتر به همراه منحنی ضریب تصحیح

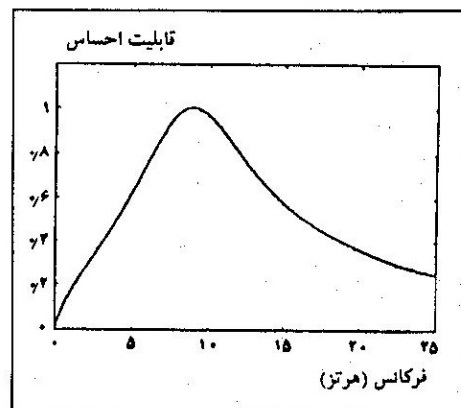
$g(f)$

روش‌های جدید ارزیابی فیلتر

در روش‌های ارزیابی و اندازه‌گیری فیلتر که در سال‌های اخیر ارائه شده و به‌خصوص در کشورهای اروپایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از اطلاعات مربوط به درصد نوسان ولتاژ، فرکانس وقوع نوسانات و منحنی مشخصه حساسیت فیلتر، به گونه‌ی دیگری برای ارزیابی بهره‌برداری می‌شود. در این روش‌ها، سیستم بینایی انسان به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. از طریق آزمایش‌های متعدد، این نتیجه به دست آمده که زنجیره لامپ - چشم - مغز به نوسانات ولتاژی که دارای فرکانس 8/8 هرتز می‌باشند، بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد. بر همین اساس برای اینکه به‌گونه‌ای احساس نسبی فیلتر به صورت کمی بیان شود، متغیری با عنوان «سطح لحظه‌ای فیلتر» (IFL) تعریف شده است. مقدار این متغیر در هر لحظه، صرفاً بیانگر احساس نسبی فیلتر می‌باشد. مطابق استاندارد EC یک شکل موج 8/8 هرتزی با دامنه 0/25 درصد ولتاژ مؤثر، متناظر با $IFL = 1$ می‌باشد. برای شکل موج‌های فیلتری که دارای فرکانس غیر از 8/8 هرتز می‌باشند، $IFL = 1$ به ازای دامنه‌های بیشتری محقق می‌گردد. آزمایش‌های متعدد نشان داده است که IFL با مربع دامنه موج فیلتر متناسب است. یعنی اگر دامنه مدولاسیون دو برابر شود، تعداد افرادی که فیلتر را

حس خواهند کرد یا به عبارت دیگر تعداد مواردی که IFL مساوی با یک ثبت می‌گردد، چهار برابر خواهد شد. در شکل (8) منحنی قابلیت احساس فیلکر که در استاندارد IEC 868 ارائه گردیده مشاهده می‌شود.

این منحنی، قابلیت احساس یک فیلکر با دامنه دلخواه را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که از منحنی پیداست، بیشترین احساس فیلکر در فرکانس‌های حدود 8 هرتز اتفاق می‌افتد. استخراج منحنی‌هایی نظیر آنچه در شکل (8) نمایش داده شده، بر اساس آزمایش می‌باشد. بدین صورت که تعدادی از افراد در معرض نور یک لامپ التهایبی قرار می‌گیرند و سپس نوسانات ولتاژی با فرکانس مشخص ایجاد می‌شود. زمانی که نصف یا بیش از نیمی از افراد متوجه پدیده فیلکر شدند، مقدار IFL معادل با یک قرار داده می‌شود. این آزمایش در فرکانس‌های مختلف در فاصله صفر تا حداکثر 30 هرتز انجام می‌شود. به‌عنوان مثال از منحنی شکل (8) می‌توان چنین استنباط کرد که اگر صددرصد افراد شرکت‌کننده در آزمایش، متوجه فیلکر 8/8 هرتزی شوند، در فرکانس 5 هرتز حدوداً 60 درصد افراد این پدیده را حس خواهند کرد.

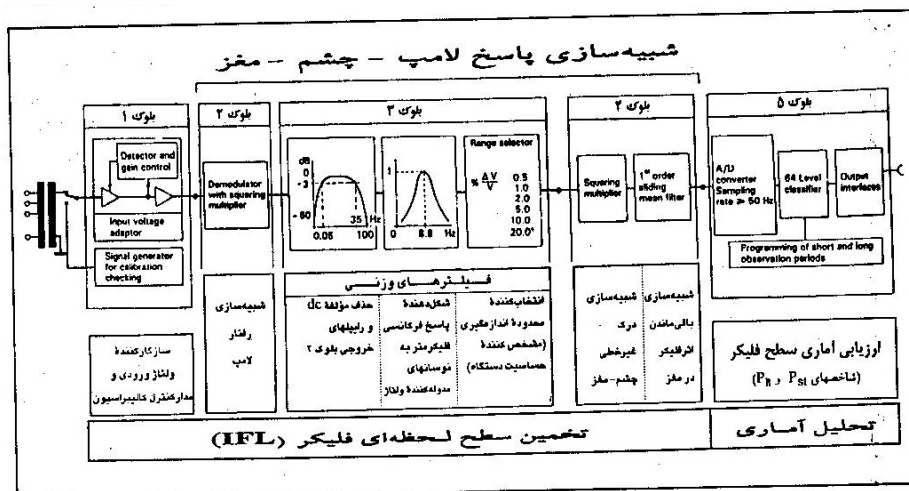


شکل (8) منحنی قابلیت احساس فیلکر مطابق با استاندارد IEC 868

بر اساس مفاهیمی که تاکنون بیان شد می‌توان دریافت که یک دستگاه اندازه‌گیر فیلکر، شبیه سیستم بینایی انسان باید دستگاهی باشد که یک نوسان ولتاژ $\frac{\Delta V}{V}$ % با فرکانس f را در ورودی خود دریافت کرده و در خروجی خود، میزان احساس فیلکر یا به عبارت دیگر مقدار متناظر IFL را ظاهر کند. به‌عنوان مثال، یک نوسان ولتاژ 0/25 درصدی با فرکانس 8/8 هرتز در ورودی فیلکرمتر، باید به مقدار $IFL = 1$ در خروجی مربوط شود. فیلکرمترهایی که بر اساس استاندارد IEC 868 طراحی و ساخته می‌شوند، چنین عملی را از طریق شبیه‌سازی سیستم بینایی انسان انجام می‌دهند. در واقع با این شبیه‌سازی، مقدار IFL از روی سیگنال ولتاژ ورودی تخمین زده می‌شود. این شبیه‌سازی از طریق

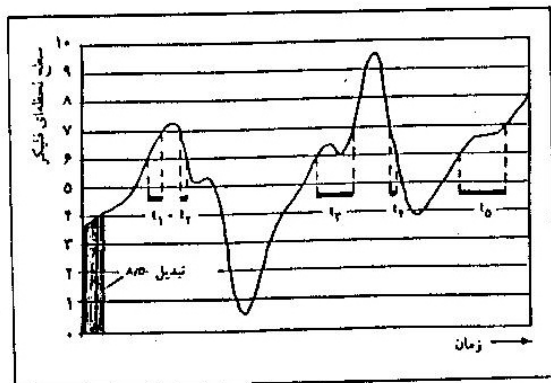
اعمالی نظیر مربع کردن سیگنال ورودی و استفاده از فیلترهای وزنی انجام می‌گیرد. به‌عنوان مثال، مربع کردن سیگنال ورودی، رفتار لامپ و فیلترهای وزنی حساسیت چشم را شبیه‌سازی می‌کنند. شکل (9) طرحی از فیلکرمتر UIE/IEC را نمایش می‌دهد.

تا اینجا معلوم گردید که فیلکرمتر وقوع انواع فیلکرها را اعم از تکراری یا غیرتکراری، صرفاً برحسب میزان قابلیت احساس آنها از دید یک مشاهده‌گر متوسط مشخص می‌کند، اما این به تنهایی برای ارزیابی فیلکر کافی نیست. حتی مقدار بیشینه IFL نیز معیار مناسبی نیست، بلکه اینکه یک مقدار مشخص از این متغیر چه مدتی دوام داشته و یا چند درصد از کل زمان مشاهده، مقدار IFL از این مقدار مشخص بیشتر شده است، می‌تواند ملاک نسبتاً قابل اعتمادی برای ارزیابی فیلکر باشد. بنابراین انجام یک سری محاسبات آماری بر روی سیگنال IFL ضروری است و این مستلزم آن است که تابعی تعریف گردد که سطوح احساس فیلکر یا به بیان دیگر مقادیر مشخصی از IFL را به درصدهای زمانی هر یک مربوط کند. برای این منظور، سیگنال IFL به تعداد مشخصی از سطوح یا کلاس‌ها تقسیم شده و برای هر کلاس یک شمارنده در نظر گرفته می‌شود. بعد از نمونه‌برداری از سیگنال فیلکر، با توجه به مقدار نمونه به‌دست آمده، کلاس آن مشخص شده و شمارنده مربوط یک واحد اضافه می‌شود. به این ترتیب تابع فراوانی مقادیر ورودی به‌دست می‌آید. اگر فرکانس نمونه‌برداری، به اندازه کافی بیش از بزرگترین فرکانس موجود در سیگنال IFL باشد، در انتهای یک فاصله زمانی مشخص، توزیع زمانی هر کلاس مشخص می‌شود. اگر محتوای شمارنده‌ها جمع شده و محتوای هر کلاس نسبت به این مجموع بیان گردد، تابع چگالی احتمال و همچنین تابع توزیع تجمعی سطوح فیلکر به‌دست می‌آید.



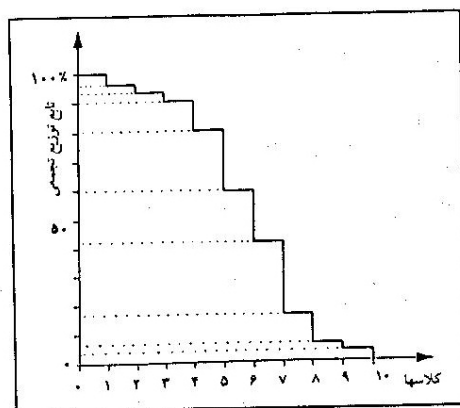
شکل (9) طرحی از فیلکرمتر UIE/IEC

در شکل (10)، سیگنال IFL به صورت یک تابع متغیر با زمان نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مجموعاً 10 کلاس برای سیگنال IFL در نظر گرفته شده است. با توجه به این شکل، به‌عنوان مثال می‌توان پایداری یا دوام سیگنال فیلکر را در کلاس 7، از مجموع زمان‌های t_1 تا t_5 به دست آورد.



شکل (10) سطح لحظه‌ای فلیکر (IFL) به صورت یک تابع متغیر با زمان

در شکل (11) تابع توزیع تجمعی پایداری سیگنال IFL، در کلاس 1 تا 10 مشاهده می‌شود. با توجه به نمودار تابع توزیع تجمعی، به راحتی می‌توان دریافت که یک کلاس مشخص از سیگنال IFL با چه احتمالی پشت سر گذاشته شده است. به‌عنوان مثال از شکل (11) مشخص می‌شود که کلاس 3 با احتمال 90٪ پشت سر گذاشته شده و یا به عبارت دیگر در 90٪، از کل مدت زمان اندازه‌گیری، سطح سیگنال IFL بیش از کلاس 3 شده است. بدیهی است درصد زمانی دوام هر کلاس از این سیگنال نیز مشخص می‌شود که در مورد اخیر این مقدار برابر با 10٪ می‌باشد.



شکل (11) تابع توزیع تجمعی پایداری سیگنال IFL در کلاس‌های 1 تا 10

مشکلی که هنوز برای ارزیابی فیلکر وجود دارد، این است که شکل منحنی‌های تابع توزیع تجمعی به‌طور قابل توجهی به نوع نوسانات ولتاژ بستگی دارد. یعنی با تغییر شکل موج فیلکر (نوع

مدولاسیون)، منحنی تابع توزیع تجمعی نیز به‌طور عمده‌ای دستخوش تغییر می‌شود. بنابراین این معیار که یک کلاس مشخص از سیگنال IFL در چند درصد از مدت زمان مشاهده، دوام داشته یا در چند درصد از مدت زمان مشاهده، پشت سر گذاشته شده است، نمی‌تواند معیار ارزیابی مناسبی برای تمامی فیلکریهایی باشد که بر اثر نوسانات ولتاژ با طبیعت غیریکسان پدید آمده‌اند. برای رهایی از مشکل وابستگی شکل منحنی تابع توزیع تجمعی به نوسانات ولتاژ و اینکه کلیه فیلکریهای ناشی از نوسانات ولتاژ مختلف به صورت خلاصه و کمی با یک معیار واحد ارزیابی شوند، پارامتری با عنوان «شاخص کوتاه‌مدت شدت فیلکر» به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$P_{st} = (K_1 P_1 + K_2 P_2 + \dots + K_n P_n)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

در این رابطه K_1 تا K_n ضرایب وزنی و P_1 تا P_n سطوحی از منحنی تابع توزیع تجمعی می‌باشند. این ضرایب به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که این معیار، شدت فیلکر را در محدوده وسیعی از فرکانس‌های مدولاسیون‌های مختلف، به‌طور صحیح منعکس کند. در استاندارد IEC868، 5 سطح احتمال مشخص شده است که عبارتند از: $P_{0.1}$ ، P_1 ، P_3 ، P_{10} و P_{50} که منظور از P_k ، سطحی از تابع توزیع تجمعی است که در k درصد از مدت مشاهده این سطح پشت سر گذاشته می‌شود. انتخاب درصدهای فوق هم بر این اساس بوده است که هر یک، دسته مشخصی از فیلکرها را مشخص کنند. مثلاً انتخاب 0.1 درصد به عنوان کمترین درصد به منظور انعکاس فیلکریهایی بوده است که دامنه نسبتاً بالایی داشته و ندرتاً و به‌طور کاملاً اتفاقی رخ می‌دهند. 5 ضریب وزنی در نظر گرفته شده نیز عبارتند از: $K_1 = 0.0314$ ، $K_2 = 0.0525$ ، $K_3 = 0.0657$ ، $K_4 = 0.28$ و $K_5 = 0.08$. این ضرایب به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از معادله (7) برای تمامی نقاط استاندارد IEC555+3 ارائه شده در مدت زمان اندازه‌گیری نتیجه $P_{st} = 1$ حاصل شود، در واقع ضرایب K_i طوری به‌دست آمده‌اند که معادله (7) به ازای $P_{st} = 1$ ، با کمترین مقدار خطا بر نقاط منحنی قابلیت احساس فیلکر که در استاندارد IEC555-3 مشخص شده برآزش یابد.

مدت زمان اندازه‌گیری، به‌طور طبیعی باید منطبق بر چرخه کار بار تولیدکننده اغتشاش باشد. اما از آنجایی که ممکن است بیش از یک بار اغتشاشی در تولید فیلکر سهمیم باشد، باید مدت زمان مشترکی مستقل از چرخه کار بارهای اغتشاشی انتخاب شود. این زمان بر اساس نتایج آزمایش‌های متعدد، برابر با 10 دقیقه انتخاب شده است. این مدت، فاصله زمانی مناسبی تشخیص داده شده که در طی آن یک مشاهده‌گر متوسط به طیف وسیعی از فیلکرها می‌تواند واکنش نشان دهد. این مدت زمان به اندازه کافی

طولانی هست که نوسانات ولتاژ شدیدی که در مدت زمان‌های بسیار کوتاه اتفاق می‌افتد، خیلی مهم تلقی نشود و در عین حال به اندازه کافی کوتاه هست که باعث اثر فیلکر ناشی از یک بار اغتشاشی که چرخه کار طولانی دارد، کاملاً مشخص شود.

مدت زمان 10 دقیقه‌ای که در طی آن، شاخص کوتاه‌مدت شدت فیلکر به دست می‌آید، صرفاً برای ارزیابی فیلکر ناشی از منابع منفردی نظیر غلتک‌های دوار، پمپ‌های حرارتی و یا مصارف خانگی مناسب می‌باشد. در مواقعی که چندین بار اغتشاشی موجود باشند که به‌طور تصادفی نیز قطع و وصل شوند و یا منبع ایجاد فیلکر مانند کوره‌های قوس الکتریکی، پریود عملکرد طولانی یا متغیری داشته باشد، ارزیابی اغتشاشات ایجاد شده، مدت زمان طولانی‌تری را می‌طلبد. به همین دلیل، شاخص جدیدی با عنوان «شاخص بلندمدت شدت فیلکر (P_{lt})» برای ارزیابی طولانی‌مدت شدت فیلکر گزینش شده است. این شاخص با استفاده از 12 مقدار متوالی P_{st} که در مدت زمان 2 ساعت به دست می‌آید، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{lt} = \left(\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{St_i}^3 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

مروری بر استانداردها

در استانداردهای موجود یا در دست تهیه، سه سطح مختلف منحصراً برای اغتشاشات از نوع فیلکر تعریف شده که عبارتند از:

1- مشخصه ولتاژ

2- سطح سازگاری

3- سطح طراحی

ارتباط میان این سه سطح به صورت زیر است:

مشخصه ولتاژ \leq سطح سازگاری $<$ سطح طراحی

معیار «مشخصه ولتاژ» بیانگر حداکثر مقدار مجاز فیلکر بوده و اندازه آن مساوی یا به مقدار جزئی بزرگتر از «سطح سازگاری» می‌باشد. استاندارد مربوط به این معیار، CENELEC EN 50160 می‌باشد. در این استاندارد، مقادیر حدی، فقط برای سطوح ولتاژ فشار ضعیف و فشار متوسط ارائه شده است و طبق این استاندارد، در شرایط معمول بهره‌برداری و در هر دوره زمانی یک هفته‌ای، شاخص بلندمدت شدت فیلکر حاصل از نوسانات ولتاژ تغذیه، در 95 درصد از مدت زمان مشاهده باید کوچکتر یا مساوی یک باشد ($P_{lt95\%} \leq 1$).

معیار «سطح سازگاری» در استانداردهای سری IEC 1000 تعریف شده است. این سری از استانداردها، برای تعیین سطوح سازگاری برای اغتشاشات مختلف، تعیین حدود انتشار و مصونیت برای آنها و نیز آزمایش‌های لازم برای تعیین این حدود می‌باشند. سطوح سازگاری پیشنهاد شده در این استاندارد برای فیلکر در شبکه‌های فشار ضعیف و متوسط عبارتند از: $P_{st95\%} = 1$ و $P_{lt95\%} = 0.8$. به بیان دیگر، در 95 درصد از کل مدت زمان مشاهده، مقادیر به دست آمده برای P_{lt} و P_{st} باید به ترتیب کوچکتر از 1 و 0.8 شوند.

معیار «سطح طراحی» در استاندارد IEC جدیدی که در حال تدوین می‌باشد، تعریف گردیده است. مقادیر «سطح طراحی» به منظور تعریف «حد انتشار» مورد استفاده قرار می‌گیرد، به طوری که به کمک آن می‌توان «حد انتشار» مناسبی با فاصله متناسب نسبت به «مشخصه ولتاژ» تعیین نمود. دلیل منظور نمودن این فاصله بین حد انتشار و مشخصه ولتاژ وجود بارها یا سیستم‌های مختلف تولیدکننده فیلکر می‌باشد که هر یک، حد انتشار متفاوتی دارند اما ترکیب فیلکر تولیدی توسط مجموعه آنها «حد انتشاری» بزرگتر از «حد انتشار» فیلکر تک تک بارها یا سیستم‌ها خواهد داشت. بنابراین فقط برای یک بار یا یک سیستم خاص «حد انتشار» کوچکتر از «مشخصه ولتاژ» تعریف می‌گردد. به طور کلی می‌توان خلاصه‌ای از آنچه که در استانداردهای مختلف برای شاخص‌های P_{lt} و P_{st} در شبکه‌های فشار متوسط پیشنهاد شده، در جدول (2) مشاهده کرد.

جدول (2) مقادیر استاندارد شاخص‌های P_{lt} و P_{st} در شبکه‌های فشار متوسط

سطح استاندارد فیلکر			شاخص
سطح طراحی	سطح سازگاری	مشخصه ولتاژ	
0/9	1/0	تعریف نشده	P_{st}
0/7	0/8	1/0	P_{lt}

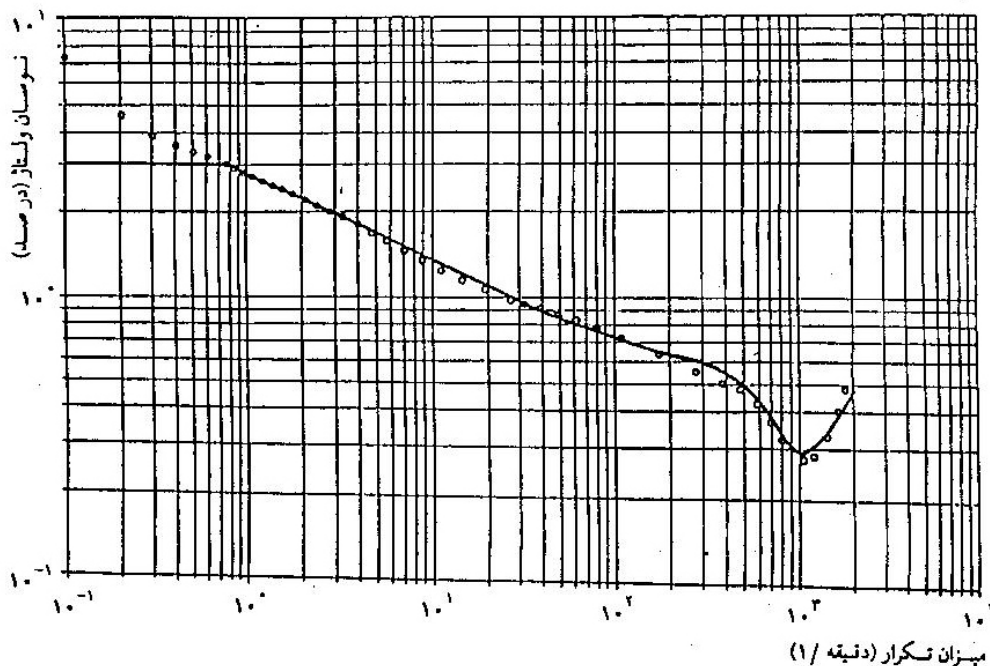
همان‌طور که در جدول (2) نیز کاملاً مشخص است، برای یک بار یا یک سیستم خاص، «سطح طراحی» کوچکتر از «سطح سازگاری» و «مشخصه ولتاژ» می‌باشد. اما باید توجه داشت که با ترکیب فیلکر ناشی از بارها یا سیستم‌های مختلف، «سطح طراحی» قابل تغییر بوده و در نهایت در یک سیستم جامع، با در نظر گرفتن تمامی بارها و سیستم‌های تولیدکننده فیلکر «سطح طراحی» به سمت «سطح سازگاری» و «مشخصه ولتاژ» میل می‌کند. بنابراین برای یک بار یا یک سیستم که به سیستم بزرگتر و جامع‌تری متصل می‌شود، معیار تعیین حد مجاز فیلکر، «سطح طراحی» سیستم جامع خواهد بود. در

زمان توسعه نهایی سیستم، سطح طراحی حداکثر می‌تواند برابر با مشخصه ولتاژ گردد. از سایر استانداردهای مرتبط با موضوع فیلکر می‌توان به استانداردهای سری IEC555 و IEC868 اشاره کرد. استانداردهای سری IEC555 در خصوص تعیین حدود انتشار برای اغتشاشات مختلف و روش انجام آزمایش برای تعیین سطوح انتشار این اغتشاشات از جانب تجهیزاتی با سطح ولتاژ فشار ضعیف می‌باشند.

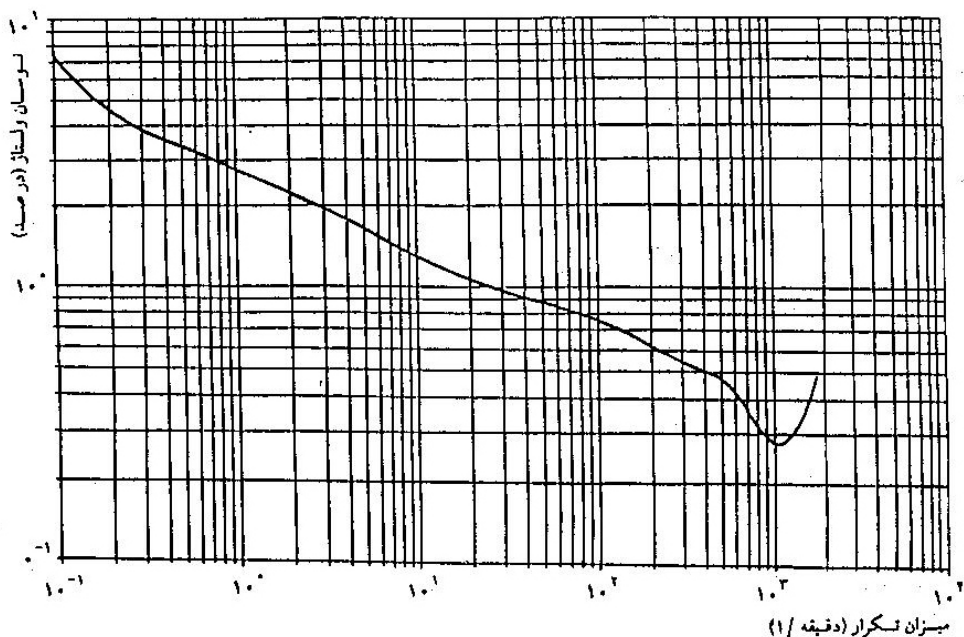
استانداردهای سری IEC868 در رابطه با اندازه‌گیری فیلکر بوده و اطلاعاتی درباره طراحی و ساخت فیلکر متر ارائه می‌نماید. در این استانداردها، حد انتشاری که در استاندارد IEC555 برای نوسان ولتاژ تعریف شده، با شاخص P_{st} مطابقت داده شده و همان‌گونه که در شکل (12) مشاهده می‌شود، مشخص شده است که این منحنی با تقریب خوبی معادل با " $P_{st}=1$ " می‌باشد. منحنی شکل (13)، منحصراً نقاطی را مشخص می‌نماید که در هر یک از آنها، نتیجه $P_{st} = 1$ محقق می‌شود.

نتیجه

1- نوسان ولتاژ یکی از شایع‌ترین اغتشاشات الکترومغناطیسی است که عمدتاً بر اثر قطع و وصل تجهیزات الکتریکی یا کارکرد بعضی از بارهای خاص نظیر کوره‌های قوس الکتریکی پدید می‌آید. تأثیر این اغتشاش بر لامپ‌های روشنایی، باعث بروز پدیده‌های موسوم به فیلکر می‌شود که در واقع یک احساس فردی از کم و زیاد شدن میزان روشنایی است.



شکل (12) منحنی حد انتشار IEC به همراه نقاطی با شدت فیلکر یکسان



شکل (13) منحنی مشخص کننده نقاطی با شدت فلیکر یکسان

2- مجموعه عواملی از قبیل درصد تغییرات مقدار مؤثر ولتاژ، فرکانس وقوع این تغییرات، میزان تأثیرپذیری یا حساسیت شخصی که در معرض این پدیده قرار می‌گیرد و نوع لامپ‌های روشنایی، در قابل احساس بودن یا آزاردهنده بودن پدیده فلیکر تأثیر می‌گذارند. تجربه نشان داده که میزان احساس فلیکر در فرکانس‌های حدود 8 هرتز بیشینه است و در این محدوده فرکانسی، بسته به منحنی‌ها و استانداردهای مختلف، با حداقل 0/25 تا 0/5 درصد تغییرات مقدار مؤثر ولتاژ، فلیکر قابل احساس خواهد بود.

3- در روش‌های قدیمی، با در اختیار داشتن درصد تغییرات یا نوسانات ولتاژ و فرکانس وقوع این نوسانات و مراجعه به منحنی‌های مشخص‌کننده سطوح احساس و آزار، فلیکر تولید شده مورد ارزیابی قرار می‌گرفت. در روش‌های جدید، میزان احساس فلیکر با نسبت دادن مقدار عددی به یک متغیر خاص مشخص می‌شود. این متغیر خاص، سطح لحظه‌ای فلیکر (IFL) تعریف شده که مقدار آن در هر لحظه صرفاً بیانگر میزان احساس فلیکر است. در فلیکرمتری‌هایی که بر اساس استاندارد IEC868 طراحی و ساخته می‌شوند، مقدار IFL با شبیه‌سازی سیستم بنایی انسان، مستقیماً از روی سیگنال ولتاژ ورودی تخمین زده می‌شود.

4- قضاوت درباره کیفیت ولتاژ و توان شبکه باید بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در یک بازه زمانی مناسب و نه در یک لحظه خاص انجام گیرد و این مستلزم تجزیه و تحلیل‌های آماری می‌باشد.

مطالعات آماری بر روی متغیر IFL منجر به تعریف دو شاخص P_{st} و P_{lt} برای اغتشاشات از نوع فلیکر شده است که به ترتیب برای ارزیابی کوتاه‌مدت (10 دقیقه) و بلندمدت (2 ساعت) شدت فلیکر به کار می‌روند.

5- در استانداردهای جدید از جمله IEC555 و IEC1000، برای تعیین حدود مجاز هر یک از اغتشاشات الکترومغناطیسی، سطوح مختلفی تعریف شده است که به‌طور مشخص برای فلیکر می‌توان به سه سطح «مشخصه و لتاژ»، «سطح سازگاری» و «سطح طراحی» اشاره نمود. بالاترین مقادیر توصیه شده در میان سطوح فوق در شبکه‌های فشار متوسط عبارتند از $P_{st95\%} = 1$ و $P_{lt95\%} = 1$ که نشان می‌دهد در 95 درصد از مدت زمان مشاهده، مقادیر P_{st} و P_{lt} باید کوچکتر از واحد یا حداکثر معادل با واحد شوند.

قسمت دوم: روش‌های تخمین

مقدمه

در قسمت اول، مفهوم پدیده فلیکر و روش‌های محاسبه و ارزیابی آن و خصوصاً چگونگی شکل‌گیری و پیشنهاد شاخص‌های P_{st} و P_{lt} به همراه استانداردهای مرتبط با این پدیده تشریح شد. در این قسمت روش‌های تخمین فلیکر و ارائه پیشنهاداتی در این زمینه می‌پردازد. با توجه به اینکه فلیکر ولتاژ یک پدیده آزاردهنده است، باید میزان آن را با روش‌های مناسب جبران‌سازی تا حد امکان کاهش داد. اما انتخاب جبران‌ساز مناسب، مستلزم در اختیار داشتن اطلاعاتی از میزان فلیکر تولیدی می‌باشد و طبیعتاً چون قبل از نصب تجهیزات کارخانه، امکان اندازه‌گیری فلیکر وجود ندارد، چاره‌ای به جز پیش‌بینی یا تخمین میزان فلیکر نیست. بدین ترتیب گرچه پارامترهای مشخص‌کننده شدت فلیکر (P_{st} و P_{lt} و ...) عملاً توسط فلیکرمتر اندازه‌گیری می‌شوند اما همچنان به روش‌هایی برای تخمین یا پیش‌بینی فلیکر به منظور آگاهی از حدود اثرات اغتشاشی بارهای الکتریکی خصوصاً از نوع کوره‌های قوس نیاز هست. هر چند به دلیل نامشخص بودن دامنه و فرکانس نوسانات ولتاژ ناشی از کوره‌های قوس، امکان توصیف فلیکر ناشی از آنها برحسب یک معادله تحلیلی وجود ندارد. بنابراین بر این نکته تأکید می‌شود که هیچ روش محاسباتی برای پیش‌بینی دقیق میزان فلیکر در تأسیسات کوره‌های قوس وجود ندارد و آنچه انجام می‌شود صرفاً یک برآورد تقریبی است که با ملاحظات صرفاً می‌توان میزان این تقریب را بهبود بخشید. در این قسمت، بعد از اشاره به دو روش نسبتاً قدیمی پیش‌بینی فلیکر، روش جدیدی که به‌طور مستقیم با حداقل اطلاعات، شاخص‌های P_{lt} و P_{st} ناشی از کوره‌های قوس را تخمین می‌زند، به‌طور دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

تخمین فلیکر ناشی از کوره‌های قوس الکتریکی

سه روش عمده برای تخمین حدود اثرات اغتشاشی کوره‌های قوس مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه، هر یک از آنها تشریح می‌گردد:

محاسبه درصد نوسان ولتاژ میانگین

گرچه دامنه و فرکانس نوسانات ولتاژی که بر اثر فعالیت کوره‌های قوس به‌وجود می‌آید، مقدار ثابتی نیست و بخصوص در دقایق اولیه عملکرد کوره‌ها، شدیداً متغیر با زمان می‌باشد، اما به تقریب یک مقدار میانگین برای مجموعه این نوسانات در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\Delta V}{V} \% = \frac{S_f}{S_{ccn}} \times 100 \quad (9)$$

در این رابطه، S_f : ظرفیت نامی کوره و S_{ccn} : ظرفیت اتصال کوتاه از دید شینه کویلاژ مشترک می‌باشد. این رابطه نشان می‌دهد که با در اختیار داشتن کمترین اطلاعات، می‌توان تخمین زد که اتصال یک کوره به یک شینه خاص، به طور متوسط چند درصد نوسان ولتاژ در شینه کویلاژ مشترک ایجاد می‌کند. همان‌گونه که برای مجموعه درصد نوسانات ولتاژ، یک مقدار میانگین تعریف شده، برای فرکانس آنها نیز یک مقدار متوسط معادل با 1/5 هرتز تعریف شده است. با معلوم بودن این دو پارامتر، منحنی‌های مشخصه فلیکر قابل استفاده شده و در نتیجه ارزیابی فلیکر امکان‌پذیر خواهد بود.

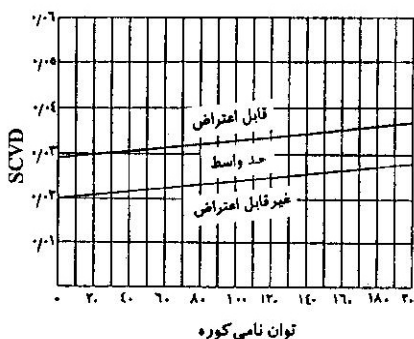
محاسبه «تنزل ولتاژ اتصال کوتاه»

کمیتی با عنوان «تنزل ولتاژ اتصال کوتاه» تعریف شده است که به صورت اختصاری SCVD نمایش داده می‌شود. برای محاسبه این کمیت رابطه زیر به کار می‌رود که مشاهده می‌شود از همان اطلاعات مورد استفاده روش قبلی بهره می‌گیرد:

$$SCVD = \frac{2S_f}{S_{ccn}} \quad (9)$$

در کوره‌های قوس الکتریکی، ظرفیت نامی هر کوره حدوداً بین 48 تا 58 درصد ظرفیت اتصال کوتاه کوره می‌باشد، بنابراین صورت کسر رابطه (9)، تقریباً همان ظرفیت اتصال کوتاه کوره است. بر این اساس، مقدار SCVD نشان می‌دهد که ظرفیت اتصال کوتاه کوره چه نسبتی از ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه می‌باشد. این نسبت تخمینی از اثر اغتشاشی کوره خواهد بود.

در شکل زیر، نموداری مشاهده می‌شود که بعد از محاسبه کمیت SCVD، به کمک آن می‌توان فلیکر ناشی از کوره‌های قوس را ارزیابی نمود.



شکل (14) SCVD برحسب ظرفیت نامی کوره یا مجموعه کوره‌ها

محاسبه شاخص‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت شدت فلیکر

برای پیش‌بینی شاخص کوتاه‌مدت شدت فلیکر، رابطه زیر پیشنهاد شده است:

$$P_{stp} = K_{st} \cdot \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} \quad (10)$$

در این رابطه:

P_{st} : سطح احتمالاتی در نظر گرفته شده برای نمونه‌های P_{st} (90٪، 95٪ یا 99٪).

K_{st} : ضریب مشخصه انتشار،

و S_{ccf} : ظرفیت اتصال کوتاه کوره از دید شینه کویلاژ مشترک می‌باشد.

رابطه (10)، شاخص کوتاه‌مدت شدت فلیکر را صرفاً در شینه کویلاژ مشترک فشار قوی تخمین می‌زند. ضریبی از فلیکری که در این شینه مشاهده می‌شود، در سطوح ولتاژ فشار متوسط و ضعیف منعکس می‌شود. اگر ضریب انتقال فلیکر را از فشار قوی به فشار ضعیف $C_{HV/LV}$ بنامیم و از تجهیزات جبران‌ساز نیز برای کاهش فلیکر استفاده شود و فرض شود که این تجهیزات با ضریب جبران‌سازی R_{comp} در تضعیف فلیکر مؤثر باشند، می‌توان رابطه کلی پیش‌بینی فلیکر در سطح ولتاژ فشار ضعیف را در حالت جبران شده به صورت زیر تنظیم کرد:

$$P_{stp} = K_{st} \cdot \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} \cdot C_{HV/LV} \cdot \frac{1}{R_{comp}} \quad (11)$$

در ادامه، هر یک از پارامترهای مؤثر در رابطه (11) تشریح می‌گردد.

سطح احتمالاتی نمونه‌های P_{st}

بدیهی است که در میان تعداد انبوهی از مقادیر P_{st} که مثلاً در طول یک هفته اندازه‌گیری می‌شود، یک یا چند مقدار که به طور قابل توجهی از سایر نمونه‌های اندازه‌گیری شده بزرگتر باشند، وجود خواهد داشت. این چند مقدار چندان بر روی کیفیت ولتاژ تغذیه تأثیر نگذاشته و موجب شکایت مصرف‌کننده نخواهند شد. به همین دلیل برای حذف یا صرفنظر از این چند مقدار بزرگ که احتمالاً به دلیل عوامل غیرقابل کنترلی مثل صاعقه ظاهر شده‌اند یا برای شاخص‌های P_{st} و P_{It} توابع توزیع تجمعی با سطوح احتمالاتی مختلف نظیر 90٪، 95٪ و 99٪ در نظر گرفته می‌شود و یا با حذف بزرگترین نمونه P_{st} یا دو نمونه‌ای که از سایر P_{st} ها بزرگترند، بزرگترین مقدار باقی‌مانده را به ترتیب با P_{st2max} و P_{st3max} نمایش داده می‌شوند، ملاک قرار می‌دهند. در رابطه با ویژگی‌ها و رابطه میان شاخص‌های P_{st2max} و P_{st3max} ، P_{st90} ، P_{st95} و P_{st99} مطالعات وسیعی انجام گرفته است. به عنوان مثال نتایج نمونه‌ای از این مطالعات نشان داده که شاخص P_{st99} تحت تأثیر اتصال کوتاه‌های شبکه قرار نمی‌گیرد. اما نظر به اینکه در استاندارد مصوب CENELEC EN 50160، سطح احتمالاتی 95٪ برگزیده شده،

در اینجا نیز تخمین کمیت $P_{st\%95}$ برگزیده شده، در اینجا نیز تخمین کمیت $P_{st\%95}$ ملاک عمل قرار داده شده است.

ضریب مشخصه انتشار (K_{st})

همان‌گونه که از رابطه (10) برمی‌آید، چنین فرض شده که میان مقادیر P_{st} و $\frac{S_{ccf}}{S_{ccn}}$ یک رابطه خطی وجود دارد و K_{st} شیب این خط را معلوم می‌کند. در مرجع نتایج اندازه‌گیری فلیکر در کارخانجات فولاد کشور بلژیک به همراه نتایجی از کارخانجات فولاد سایر کشورها در جدولی شبیه جدول (3) خلاصه شده است. در این جدول، S_{comp} ظرفیت جبران‌ساز می‌باشد و سایر متغیرها قبلاً تعریف شده‌اند.

شماره	S_f MVA	S_{ccf} MVA	S_{ccn} MVA	$\frac{S_{ccf}}{S_{ccn}}$ %	$P_{st\%99}$	K_{st}	$\frac{S_{comp}}{S_f}$	$P_{st\%99}$ با جبران‌سازی	R_{comp} (p.u.)
۱	-	-	-	۱/۷۰	۱/۶۰	۹۴	-	-	-
۲	-	-	-	۴/۴۰	۳/۳۵	۷۶	-	-	-
۳	-	-	-	۵/۱۰	۳/۸۰	۷۵	-	-	-
۴	-	-	-	۵/۹۵	۴/۷۰	۷۹	-	-	-
۵	-	-	-	۸/۶۰	۶/۳۰	۷۳	-	-	-
۶	-	-	-	۸/۹۵	۴/۶۵	۵۲	-	-	-
۷	-	-	-	۹/۸۰	۵/۶۵	۵۸	-	-	-
۸	-	-	-	۱۲/۱۵	۹/۱۰	۷۵	-	-	-
۹	-	-	-	۱۳/۶۵	۷/۱۰	۵۲	-	-	-
۱۰	-	-	-	۲۱/۰۰	۱۱/۲۵	۵۴	-	-	-
۱۱	۹۶	۱۹۲	۴۹۰۰	۳/۹۲	-	-	۱/۱۵	۱/۲۶	۱/۶۰
۱۲	۴۳	۸۶	۲۷۰۰	۳/۱۹	-	-	۱/۴۰	۱/۵۴	۱/۵۶
۱۳	۴۰	۸۰	۳۵۰۰	۲/۲۹	۱/۹۶	۸۶	-	-	-
۱۴	۵۰	۱۰۰	۳۶۰۰	۲/۷۸	-	-	-	۱/۴۰	-
۱۵	۳۶	۷۲	۲۳۰۰	۳/۱۳	۲/۶۶	۸۵	-	-	-
۱۶	۲۰	۴۰	۲۳۰۰	۱/۷۴	۱/۶۸	۹۷	-	-	-
۱۷	۴۲	۸۴	۲۸۰۰	۳/۰۰	۴/۰۶	۱۳۵	-	-	-
۱۸	۳۶	۷۲	۱۴۰۰	۵/۱۴	۲/۱۰	۴۱	-	-	-
۱۹	۵۰	۱۰۰	۱۰۲۵۰	۰/۹۷۶	۱/۱۲	۱۱۵	-	-	-
۲۰	۲۵	۴۳	۱۲۶۰	۳/۴۱	۲/۶۷	۷۸	-	-	-
۲۱	۲۵	۴۳	۱۳۵۰	۳/۱۹	۲/۵۵	۸۰	-	-	-
۲۲	۲۵	۴۳	۱۶۳۰	۲/۶۸	۲/۲۰	۸۲	-	-	-
۲۳	۲۵	۵۱	۱۵۲۵	۳/۳۲	۲/۲۰	۶۶	-	-	-
۲۴	۲۵	۵۱	۱۷۸۰	۲/۸۷	۲/۱۰	۷۳	-	-	-
۲۵	۹۶	۱۹۵	۲۹۳۰	۶/۶۶	۵/۵۸	۸۴	۱/۱۵	۳/۴۹	۱/۶۰
۲۶	۴۷	۸۵	۱۱۵۰	۷/۳۹	۶/۴۰	۸۷	۰/۴۲	۵/۶۰	۱/۱۴
۲۷	-	-	-	۱۷/۸۶	۱۲/۵۰	۷۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۲/۵۰
۲۸	-	-	-	۲/۴۱	۲/۱۰	۸۷	۱/۵۰	۱/۰۰	۲/۱۰
۲۹	۷۰	۱۴۶	۶۴۰۰	۲/۲۸	۱/۶۲	۷۱	۲/۰۰	۰/۶۰	۲/۷۰
۳۰	۵۰	۱۰۰	۶۲۷۰	۱/۵۹	۱/۲۵	۷۸	-	-	-
۳۱	۱۰۰	۱۸۳	۶۶۰۰	۲/۷۷	۱/۸۴	۶۶	۰/۳۰	۱/۲۹	۱/۴۲

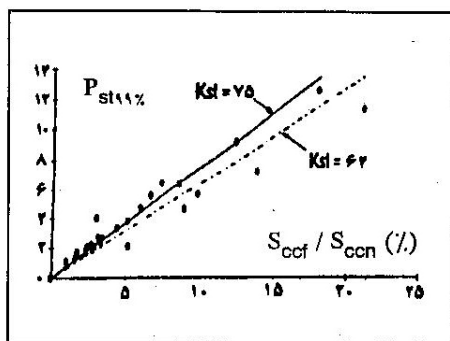
جدول (3) نمونه‌هایی از نتایج اندازه‌گیری فلیکر به وسیله فلیکرمتر UIE/IEC

در جدول (3)، مقادیر K_{st} در 28 حالت، یعنی حالت‌هایی که امکان اندازه‌گیری بدون جبران‌ساز وجود داشته، ارائه شده است. در واقع با اندازه‌گیری مقادیر P_{st} و در نتیجه معلوم شدن مقدار $P_{st\%99}$ و با توجه به مقادیر S_{ccf} و S_{ccn} مقدار K_{st} در هر مورد از 28 حالت فوق به دست آمده است. سپس مقادیر $P_{st\%99}$ برحسب مقادیر درصدی $\frac{S_{ccf}}{S_{ccn}}$ در یک نمودار رسم گردیده و مطابق شکل (15) خطی به مجموعه این نقاط برازش داده شده است، که طبعاً ضریب زاویه این خط، بهترین مقدار K_{st} را برای این 28 حالت

مشخص می‌نماید. گر چه بهترین خط برازش یافته به نقاط موجود، مقدار $K_{st} = 64$ را نتیجه می‌دهد، اما در مرجع مقدار واقع بینانه‌تر $K_{st} = 75$ پیشنهاد شده است. این پیشنهاد برای شاخص $P_{st\%99}$ بوده است. با توجه به رابطه تقریبی:

$$P_{st\%99} \approx 1.25P_{st\%95} \quad (12)$$

برای معیار $P_{st\%95}$ ، مقدار $K_{st} = 60$ می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. این مقدار دقیقاً همان مقداری است که پیمانکار فرعی طرح فولاد آلیاژی ایران در محاسبات خود در نظر گرفته است.



شکل (15) «سطح فلیکر» برحسب «تنزل ولتاژ اتصال کوتاه» در 28 حالتی که امکان اندازه‌گیری بدون جبران‌ساز وجود داشته است.

ظرفیت اتصال کوتاه کوره معادل

در کارخانجات فولاد، عموماً بهره‌برداری از چندین کوره انجام می‌گیرد. در این حالت به منظور تخمین فلیکر، باید برای مجموعه کوره‌های فعال، یک ظرفیت اتصال کوتاه معادل (S_{ccfeq}) محاسبه شده و در رابطه (11) جایگزین عامل S_{ccf} شود. در واقع در این حالت، مسأله یافتن ظرفیت کوره‌ای است که به تنهایی دارای اثرات اغتشاشی چند کوره فعال موجود باشد. برای این مسأله، راه‌حل‌های متعددی تاکنون ارائه شده که متأسفانه همگی آنها الزاماً به جواب‌های یکسانی منجر نمی‌شوند. در ادامه به چند روش مشهورتر اشاره می‌شود:

• **قانون مکعبات:** در این روش، مطابق رابطه (13)، ریشه سوم مجموع مکعبات ظرفیت کوره‌ها به‌عنوان ظرفیت معادل انتخاب گردد:

$$S_{ccfeq} = \sqrt[3]{S_{ccf1}^3 + S_{ccf2}^3 + \dots} \quad (13)$$

• **قانون مربعات:** در این روش، مطابق رابطه (14)، ریشه دوم مجموع مربعات ظرفیت کوره‌ها به‌عنوان ظرفیت معادل انتخاب می‌گردد:

$$S_{ccfeq} = \sqrt{S_{ccf1}^2 + S_{ccf2}^2 + \dots} \quad (14)$$

ضریب انتقال فلیکر (C_{HV/LV})

هر چه از نظر الکتریکی از بار ایجادکننده فلیکر ولتاژ به سمت منبع اصلی شبکه حرکت شود اثر فلیکر ولتاژ کاهش می‌یابد، به طوری که فلیکر در سطح ولتاژ بسیار بالا می‌تواند از مقدار مجاز بسیار کمتر باشد. در حالت ایده‌آل هم با توجه به اینکه شینه کویلاژ مشترک، شینه بی‌نهایت است، اثر فلیکر ولتاژ حذف خواهد شد. بعد از انتقال فلیکر ولتاژ به شینه کویلاژ مشترک، انعکاس آن به سایر سطوح ولتاژ شبکه (از فشار قوی به فشار متوسط و فشار ضعیف) به همراه یک مقدار تضعیف انجام می‌گیرد. به همین منظور ضریبی با عنوان ضریب تضعیف یا انتقال فلیکر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{HV/LV} = P_{stLV} / P_{stHV} \quad (15)$$

کمیت بالا، نمایانگر ضریب انتقال فلیکر از فشار قوی به فشار ضعیف می‌باشد. مقادیر معمول این ضریب عموماً بین 0.6 تا 0.8 است. به عنوان نمونه، بر اساس یک سری از اندازه‌گیری‌ها در بلژیک مقدار متوسط $C_{HV/LV} = 0.65$ به دست آمده است. به همین ترتیب در ایتالیا مقدار متوسط 0.7 برای روزهای کاری و 0.81 برای تعطیلات آخر هفته به دست آمده است. تاکنون در کشور ما این ضریب تعیین نشده ولی به احتمال زیاد در همان محدوده 0.6 تا 0.8 خواهد بود. لازم به ذکر است که انتقال فلیکر از فشار متوسط به فشار ضعیف با تضعیف کمتری انجام می‌گیرد.

ضریب جبران‌سازی (R_{comp.})

بعد از اندازه‌گیری مقادیر P_{st} در دو حالت جبران شده و جبران نشده می‌توان میزان جبران‌سازی تحقق‌یافته در اثر نصب تجهیزات جبران‌ساز از رابطه زیر به دست آورد:

$$R_{comp.} = \frac{P_{st\%95}^{SVC} \text{ بدون}}{P_{st\%95}^{SVC} \text{ با}} \quad (16)$$

اما آنچه اهمیت دارد، تخمین این ضریب قبل از نصب تجهیزات و مهیا شدن امکانات اندازه‌گیری می‌باشد. تجربه نشان داده است که تا قبل از رسیدن به حد اشباع هر چه نسبت ظرفیت نامی SVC به ظرفیت نامی کوره بیشتر باشد، مقدار عددی ضریب جبران‌ساز یا میزان کاهش فلیکر بیشتر خواهد بود. رابطه‌ای که تاکنون برای تخمین این ضریب ارائه شده، به صورت زیر می‌باشد:

$$R_{comp.} \cong 1 + 0.75 \left(\frac{S_{SVC}}{S_f} \right) \quad (17)$$

معادله فوق، معادله بهترین خط برازش‌یافته به مجموعه نقاط در دسترس $\left(\frac{S_{SVC}}{S_f}, R_{comp.} \right)$ بوده

است. در رابطه با میزان کاهش فلیکر، دو نکته اساسی قابل توجه است، اول آنکه با فن‌آوری فعلی،

حداکثر ضریب جبران‌سازی قابل انتظار 3 می‌باشد و دوم آنکه همان‌گونه که در جدول (3) نیز مشاهده می‌شود، در کشورهای اروپایی $\frac{S_{SRC}}{S_f}$ بزرگتر از 2 استفاده نشده است.

قسمت سوم: تجزیه و تحلیل داده‌ها و نتیجه‌گیری

مقدمه:

کارخانجات فولاد به دلیل بهره‌گیری از کوره‌های قوس الکتریکی به‌عنوان یکی از اغتشاشی‌ترین بارهای الکتریکی، از عوامل اصلی ایجاد فلیکر در شبکه محسوب می‌گردند. در این قسمت گزارشی از بررسی‌های به‌عمل آمده در رابطه با فلیکر ناشی از کارخانه فولاد آلیاژی ایران را می‌خوانیم. در این گزارش ضمن بررسی پیش‌فرض‌های پیمانکار، پارامترهای مؤثر بر پدیده فلیکر، در مورد کارخانه فولاد آلیاژی ایران به دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. بعد از ارزیابی اثر اغتشاشی بخش نورد، روش‌شناسی انتخاب استاندارد و بررسی نتایج اندازه‌گیری فلیکر، مقادیر تضمین شده، اندازه‌گیری شده و استاندارد مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج بررسی‌ها حاکی از پایین بودن نسبی ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه کارخانه دارد. با این وجود حداکثر جبران‌سازی ممکن برای کارخانه فولاد آلیاژی ایران صورت گرفته و مقادیر تضمین شده با دقت بالایی در عمل محقق شده‌اند. هر چند از سطح استاندارد ویژه‌ای که باید برای این کارخانه مورد توجه قرار گیرد، کمی بالاتر است.

هدف از ارائه این پروژه که در واقع گزارشی از بررسی‌های به‌عمل آمده در رابطه با فلیکر کارخانه فولاد آلیاژی ایران می‌باشد، دستیابی به یک قضاوت صحیح و عادلانه درباره مجاز یا غیرمجاز بودن شدت فلیکر ناشی از این کارخانه بوده است.

بعد از تشریح شبکه داخلی، تغذیه و جبران‌ساز کارخانه در حدی که برای مطالعات فلیکر لازم و قابل استفاده است، مقادیر تضمین شده شدت فلیکر توسط پیمانکار به همراه پیش‌فرض‌های مربوط ارائه می‌گردد و سپس فلیکر کارخانه فولاد آلیاژی ایران از ابعاد مختلف نظیر ظرفیت اتصال کوتاه کوره معادل و شینه تغذیه و امکان جبران‌سازی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

یکی از پیش‌فرض‌های مقدار تضمین شده فلیکر در شینه 33 کیلوولت نورد، آماده به کار بودن بخش‌های نورد سنگین و سبک بوده است. مطالعات موردی انجام شده در بخش (7) به منظور تخمین اثرات اغتشاشی این بخش می‌باشد.

همان‌گونه که در قسمت اول مطرح شد، سه سطح «مشخصه ولتاژ»، «سطح سازگاری» و «سطح طراحی» برای فلیکر تعریف شده است. گرچه پیمانکار طرح با معیار قرار دادن استاندارد CENELEC

EN50160 در واقع سطح مشخصه ولتاژ را برگزیده است، اما همچنان این سؤال مطرح است که معیار گزینش این سطوح برای یک بار الکتریکی نظیر کارخانه فولاد چیست؟ مطالب بخش (7) پاسخی به این سؤال خواهد بود. در انتها، نتایج اندازه‌گیری فلیکر مورد بررسی قرار گرفته و با مقادیر تضمین شده و استاندارد مقایسه می‌گردد.

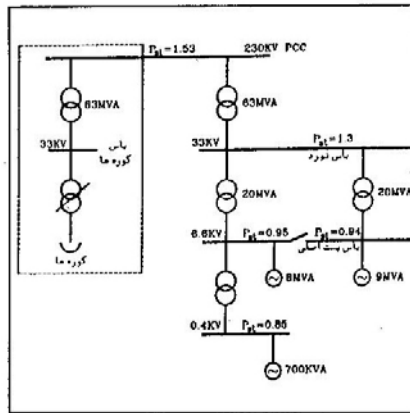
تشریح شبکه داخلی و تغذیه کارخانه فولاد آلیاژی ایران

تغذیه کارخانه فولاد آلیاژی ایران واقع در استان یزد از شینه کویلاژ مشترک 230 کیلوولتی صورت می‌گیرد. بر اساس مقادیر اعلام شده به پیمانکار، برای ظرفیت اتصال کوتاه این شینه به ترتیب برای بهره‌برداری مرحله اول و دوم کارخانه مقادیر 1390 و 3700 مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است. محاسبات اتصال کوتاه انجام شده با توجه به وضعیت و ترکیب بندی شبکه ایران در زمان راه‌اندازی کارخانه (سال 1377) نمایانگر ظرفیت اتصال کوتاه 1566 مگاوات آمپر در شینه 230 کیلوولت تغذیه کارخانه می‌باشد.

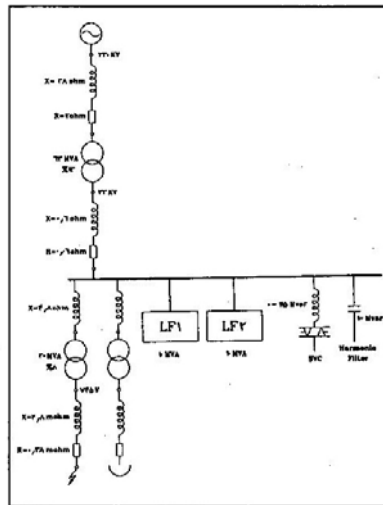
بخش‌های متعدد داخلی کارخانه از شینه‌های 33، 6.6 و 0.4 کیلوولت تغذیه می‌شوند. دو بخش عمده کارخانه، بخش‌های نورد و کوره می‌باشند که مجموعه کوره‌ها از طریق ترانسفورماتورهای مربوط و بخش نورد به طور مستقیم به شینه 33 کیلوولتی متصل می‌باشند، اما به دلیل ملاحظات فلیکر و افت ولتاژ، تغذیه این دو بخش از دو شینه 33 کیلوولتی مجزا صورت می‌گیرد. دیاگرام تک‌خطی (شکل 16) تا حدودی بخش‌های مختلف کارخانه را نمایش می‌دهد. در این دیاگرام موتورهای بزرگ بخش نورد منعکس شده‌اند.

بخش کوره

آنچه در شکل (16) در داخل نقطه چین آورده شده، در شکل (17) با جزئیات بیشتری آمده است. مشاهده می‌شود که در مرحله اول، مجموعاً از 4 کوره (2 کوره از نوع EAF و 2 کوره از نوع LF) بهره‌برداری می‌شود. ترانسفورماتورهای کوره‌های EAF و LF به ترتیب به ظرفیت 30 و 10 مگاوات آمپر می‌باشند. ظرفیت اتصال کوتاه کوره‌های EAF(Electric Arc Furnace) از دید شینه کویلاژ مشترک برابر با 65 و 55 مگاوات آمپر (بسته به شرایط) و برای کوره‌های LF(Ladle Furnace) برابر با 23 مگاوات آمپر می‌باشند.



شکل (16) دیاگرام تکخطی ساده شده کارخانه فولاد آلیاژی ایران



شکل (17) دیاگرام تکخطی بخش کوره به همراه تجهیزات جبران ساز

بخش نورد

بخش نورد شامل دو بخش سنگین و سبک می باشد. در میان بارهای موجود در بخش نورد سنگین یک موتور سنکرون به ظرفیت 5.4 مگاوات و دو موتور سنکرون دیگر هر یک به ظرفیت 2.7 مگاوات و نیز در بخش نورد سبک، یک موتور سنکرون 2.7 مگاوات قابل توجه می باشند. بر اساس اظهارات کارشناسان شرکت فولاد آلیاژی، فرکانس قطع و وصل این موتورها بالا بوده و احتمال همزمانی فعالیت دو بخش نورد و کوره بالاست.

توان های اکتیو و راکتیو مصرفی بخش نورد با در نظرگیری ضریب همزمانی بار بین 0.85 تا 0.9 به ترتیب 56 مگاوات و 23 مگاوار فرض شده است.

بارهای موجود در سایر بخش‌ها

علاوه بر کوره‌ها و بارهای موجود در بخش نورد، بارهای متعدد دیگری نیز در کارخانه موجودند که در میزان شدت فلیکر مؤثرند. این موتورها عبارتند از موتورهای همزمان کوره‌های LF، کمپرسورهای هوا، اکسیژن، نیتروژن و ... مجموعه این بارها با سه موتور با ظرفیت‌های 9، 8 و 0.7 مگاوات آمپر معادل‌سازی شده‌اند و در شکل (16) مشاهده می‌شوند.

تجهیزات جبران‌ساز کارخانه فولاد آلیاژی ایران

تجهیزات جبران‌ساز در نظر گرفته شده در کارخانه فولاد آلیاژی ایران شامل راکتور سری، SVC و فیلتر هارمونیک می‌باشد. برای هر یک از کوره‌های EAF، یک راکتور سری با امپدانس نامی 6 اهم با تیپ‌های 20، 40، 60، 80 و 100 درصد بین ترانس کوره و شینه 33 کیلوولتی قرار می‌گیرد. در شینه کوره برای تأمین سه هدف تثبیت ولتاژ، تصحیح ضریب توان و متعادل‌سازی بار از تجهیزات SVC از نوع TCR با 4 فیلتر هارمونیک مجموعاً به ظرفیت 100 مگاوار برای هارمونیک‌های مرتبه 2، 3، 4 و 5 استفاده شده است. فیلترهای مربوط به هارمونیک‌های مرتبه 2، 4 و 5 هر یک به ظرفیت 20 مگاوار و برای هارمونیک 3، 40 مگاوار می‌باشد. در شینه نورد برای تصحیح ضریب توان از دو فیلتر برای هارمونیک‌های مرتبه 2 و 11 به ترتیب به ظرفیت‌های 18 و 26 مگاوار استفاده شده است. در مرحله دوم بهره‌برداری کارخانه، یک فیلتر دیگر به ظرفیت 15 مگاوار نصب خواهد شد. لازم به ذکر است که محدوده ظرفیت SVC در مرحله اول بهره‌برداری کارخانه از 15- تا 100 مگاوار و در مرحله دوم از صفر تا 115 مگاوار می‌باشد.

مقادیر تضمین شده شدت فلیکر توسط پیمانکار و مفروضات در نظر گرفته شده

در دفترچه محاسبات پیمانکار فرعی پروژه، بدون در نظرگیری شرط یا شروط خاصی برای فعالیت بخش نورد و نیز موتورهای سایر بخش‌ها، به مقادیر $P_{1t\%95}=1.45$ و $P_{st\%95} = 1.7$ تا 1.9 در شینه کوپلاژ مشترک 230 کیلوولت اشاره شده است. این مقادیر بر اساس ظرفیت اتصال کوتاه 1390 مگاوات آمپر در ترکیب‌بندی مرحله اول ارائه شده است. البته به استاندارد P28 از کشور انگلستان نیز اشاره شده ($P_{st} \leq 0.8$ و $P_{1t} \leq 0.6$ در HV) و بیان گردیده که به دلیل ظرفیت اتصال کوتاه پایین در مرحله اول، نمی‌توان به این مقادیر توصیه شده رسید، اما در مرحله دوم با ظرفیت اتصال کوتاه 3700 مگاوات آمپر به راحتی این نتیجه حاصل خواهد شد. به علاوه مقادیر حدود 2 برای P_{st} در کشورهای اروپایی، بر اساس اندازه‌گیری‌هایی که انجام شده و در مقالات منعکس گردیده، کاملاً طبیعی است.

در رابطه با فلیکر کارخانه فولاد آلیاژی ایران، عمده‌ترین شرایط در نظر گرفته شده و نکات مطرح شده از سوی پیمانکار عبارتند از:

1- به‌طور صریح مقدار ضرایب K_{st} و R_{comp} که مستقیماً در تخمین شدت فلیکر دخالت دارند، اعلام نشده است و بیان گردیده که این دو ضریب مبتنی بر تجربیات آنان بوده و به نوع کوره، راکتور سری، نوع بار، نحوه عملکرد کوره‌ها و اندازه جبران‌ساز بستگی دارند. صرفاً در ضمیمه مربوط به یکی از مکاتبات انجام شده میان شرکت فولاد آلیاژی و پیمانکار اصلی طرح، به‌طور ضمنی مقادیر $K_{st} = 60$ و $R_{comp} = 2$ مطرح شده‌اند.

2- در رابطه با نسبت ظرفیت نامی SVC به ظرفیت نامی ترانس کوره که در کارخانجات فولاد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چنین بیان شده: «این نسبت در کارخانجات فولاد معمولاً برابر 1.5 می‌باشد، اما در کارخانه فولاد آلیاژی ایران حتی با در نظر گرفتن ترکیب‌بندی مرحله دوم برای کوره‌ها، معادل با 2.2 می‌باشد و به نظر می‌رسد که این بهترین نتیجه ممکن با توجه به ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه باشد.»

3- در رابط با بستگی مقادیر P_{st} و P_{lt} چنین بیان شده: «اندازه‌گیریها نشان داده که مقادیر P_{st} و P_{lt} به شرط ثابت بودن نحوه عملکرد کوره‌ها رابطه خطی دارند و نسبت $\frac{P_{st}}{P_{lt}}$ در فشار قوی معمولاً بین 1.15 تا 1.2 می‌باشد.»

4- شاخص بلندمدت شدت فلیکر (P_{lt}) صرفاً در شینه کوپلاژ مشترک فشار قوی تضمین شده است (برای سایر سطوح ولتاژ مقداری برای این شاخص تضمین نشده است). در یکی از مکاتبات، تأکید شده است که تمامی تولیدکنندگان سیستم‌های جبران‌ساز فلیکر، آمادگی تضمین مقدار فلیکر را منحصراً در شینه کوپلاژ مشترک فشار قوی دارا می‌باشند. در عین حال، پیمانکار به این نکته نیز توجه داشته که هیچ استانداردی برای شدت فلیکر در فشار قوی وجود ندارد. در یکی از مکاتبات چنین مطرح شده که در استاندارد CENELEC CEN50160 مقدار توصیه شده برای P_{st} و یا P_{lt} در فشار قوی وجود ندارد و در این حالت سطوح طراحی به عهده تغذیه‌کنندگان انرژی الکتریکی گذاشته شده و در تعریف آن، ضرایب انتقال از فشار قوی به فشار متوسط و از فشار متوسط به فشار ضعیف باید مورد توجه قرار گیرند. این ضرایب به مشخصات سیستم بستگی داشته و تجربه پیمانکار در کشور خود به صورت زیر بوده است:

$$C_{MV/LV} = 0.9 \text{ تا } 0.95 \quad ; \quad C_{HV/MV} = 0.8$$

با توجه به اصرار کارفرما مبنی بر محدودسازی هر چه بیشتر فلیکر، پیمانکار طرح با در نظر گرفتن شرایط و پیش‌فرض‌های بیشتری، مقادیر مناسب‌تری را تضمین نموده است. روند محدودسازی و گام‌های برداشته شده برای کاهش مقادیر تضمینی فلیکر که در ضمیمهٔ یکی از مکاتبات آمده است، در جدول (4) خلاصه شده است.

همان‌گونه که در جدول (4) مشاهده می‌شود، آخرین مقدار تضمین شدهٔ پیمانکار در شینهٔ کوپلاژ مشترک 230 کیلوولت، $P_{st\%95} = 1.53$ و $P_{lt\%95} = 1.33$ می‌باشد و نیز در رابطه با تضمین این مقادیر اشاره‌ای به فعال بودن یا نبودن بخش نورد نشده است.

علاوه بر دو مقدار بالا، مقادیری برای $P_{st\%95}$ در سایر سطوح ولتاژ (0.4، 6.6 و 33 کیلوولت شینهٔ نورد) تضمین شده است که در شکل (16) مشخص شده است و برای تحقق آنها سه شرط اضافی زیر در نظر گرفته شده است:

- 1- فقط مرحلهٔ اول بهره‌برداری کارخانه در نظر گرفته شود.
- 2- بخش‌های نورد سنگین و سبک در حال آماده به کار باشند.
- 3- ظرفیت معادل موتورهای نصب شده در قسمت‌های مختلف، کمینه در نظر گرفته شوند. (در واقع ظرفیت موتورهای نصب شده در بخش‌های مختلف، بیش از آن مقداری است که در شکل (16) مشخص شده و آنچه در این شکل با مقادیر 8، 9 و 0.7 مگاوات آمپر مشاهده می‌شود، مقدار کمینه است.)

نوع و تعداد کوره‌ها	شرایط کاری	ظرفیت کوره‌ها (MVA)	رابطه در نظر گرفته شده برای ظرفیت اتصال کوتاه معادل	$P_{st\%95}$	$\frac{P_{st\%95}}{P_{lt}} \in [1/15, 1/7]$
EAFF × ۲ LF × ۲	عملکرد همزمان کوره‌ها (۷۴۶۷)	A = B = ۶۵ LF _۱ = LF _۲ = ۲۳	$\sqrt{A^2+B^2+LF_1^2+LF_2^2}$	۲/۱	۱/۸۲
EAFF × ۲ LF × ۲	عملکرد بهینه کوره‌ها مطابق دیاگرام شکل (۳)	A = B = ۶۵ LF _۱ = LF _۲ = ۲۳	$\sqrt{A^2+B^2+LF_1^2+LF_2^2}$	۱/۷۹	۱/۵۶
EAFF × ۲ LF صرف نظر از LF	عملکرد بهینه کوره‌ها مطابق دیاگرام شکل (۳)	A = B = ۶۵	$\sqrt{A^2+B^2}$	۱/۷۷	۱/۵۴
EAFF × ۲ LF × ۲	عملکرد بهینه، بار = ۱۰ درصد آهن قرافه، راکتور سری در تپ ۴/۸ Ω، نقطه کار ۵۶۴ V و ضریب توان ۰/۸۱	A = B = ۵۵ LF _۱ = LF _۲ = ۲۳	$\sqrt{A^2+B^2+LF_1^2+LF_2^2}$	۱/۵۳	۱/۳۳

جدول (4) مراحل محدودسازی مقدار تضمینی شدت فلیکر در شینهٔ تغذیهٔ کارخانه فولاد آلیاژی

ایران

پیمانکار مقدار $P_{It\%95}$ را صرفاً در سطح ولتاژ فشار قوی تضمین نموده و در شینه 33 کیلوولت نورد بیان نموده که در شرایط عادی بهره‌برداری، انتظار می‌رود که $P_{It\%95}$ در محدوده 0.91 تا 1.04 باشد.

بررسی معتبر بودن مفروضات در نظر گرفته شده پیمانکار

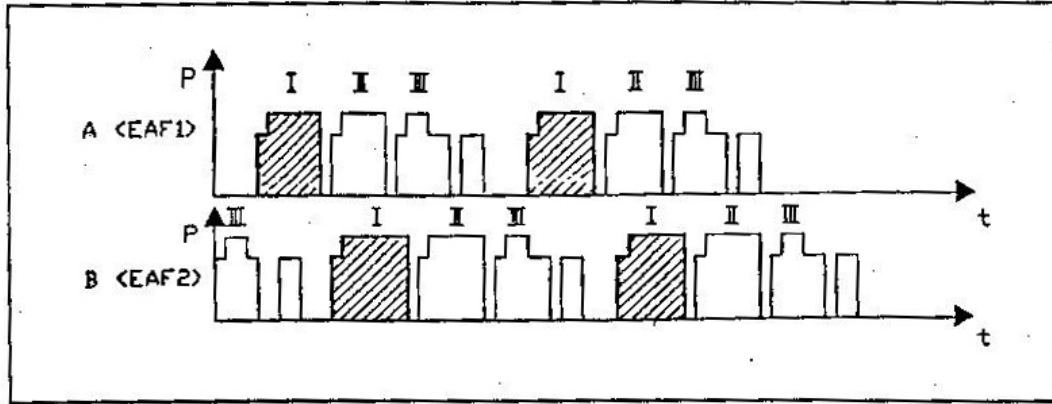
طبق مدارک ارائه شده پیمانکار و همان‌گونه که در جدول (4) نیز مشاهده می‌شود چند روش مختلف بهره‌برداری برای کوره‌ها فرض شده است و بر اساس یکی از آن روش‌ها، شدت فلیکر در شینه کویلاژ مشترک تضمین شده است. اگر روش معمول بهره‌برداری از کارخانه، غیر از موارد مشخص شده در جدول (4) و بخصوص مورد چهارم این جدول که بر اساس آن مقدار شدت فلیکر تضمین شده است باشد، نتایج ارائه شده و تضمین شده معتبر نخواهند بود. به عبارت دیگر، تضمین مقداری برای شدت فلیکر بر اساس فرضیاتی که در عمل محقق نشوند، از ارزش چندانی برخوردار نیست. بنابراین مشخص بودن قطعی روش معمول بهره‌برداری از کوره‌های قوس اعم از مسأله همزمانی عملکرد کوره‌ها، نوع مواد اولیه ذوب از قبیل آهن قراضه یا آهن اسفنجی و نسبت ترکیب آنها، نقطه کار کوره و مسأله همزمانی عملکرد بخش نورد با بخش کوره، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و همگی عوامل ذکر شده در قضاوت نهایی مؤثرند.

بررسی فلیکر کارخانه فولاد آلیاژی ایران از ابعاد مختلف

• ظرفیت اتصال کوتاه کوره معادل

یکی از مشکلات عمده محاسبه فلیکر، ناهمگونی نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف برای یافتن ظرفیت اتصال کوتاه کوره معادل میباشد که در صورت نامشخص بودن روش معمول بهره‌برداری از کوره‌های قوس و نقطه کار کوره‌ها به صورت جدی‌تری مطرح خواهد شد. جدول (5) پراکندگی نتایج به دست آمده برای ظرفیت اتصال کوتاه کوره معادل را به ازای شرایط کاری مختلف در نظر گرفته شده در جدول (4) و نیز روش‌های معادل‌یابی گوناگون نشان می‌دهد.

ذکر این نکته نیز ضروری است که در بعضی مراجع از تأثیر کوره‌های LF صرفنظر می‌شود یا تأثیر آن با ظرفیت نصف در نظر گرفته می‌شود که این خود باعث پراکندگی بیشتر نتایج محاسبات خواهد شد.



شکل (18) دیاگرام بهره‌برداری از کوره‌های قوس در کارخانه فولاد آلیاژی ایران

	$S_{ccfeq}(MVA)$	
	$EAF=65MVA$	$EAF=55MVA$
	$LF = 23MVA$	$LF = 23MVA$
براساس قانون مربعات	97/51	84/31
براساس قانون مکعبیات	83/09	70/95
براساس روش Jenkin	78/54	66/83

جدول (5) نتایج محاسبات تعیین ظرفیت اتصال کوتاه کوره معادل بر اساس شرایط و روش‌های

مختلف

• ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه

یافتن پاسخی برای این سؤال که با توجه به ظرفیت اتصال کوتاه 1390 مگاوات آمپر (آنچه که پیمانکار در نظر گرفته)، آیا تعداد و ظرفیت کوره‌های قوس مناسب انتخاب شده است یا خیر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رابطه (18) به عنوان معیار ارزیابی در حالت جبران نشده مطرح شده است:

$$\frac{S_{ccn}}{S_{ccf}} \geq 60 \quad (18)$$

این رابطه بدین معناست که اگر تجهیزات جبران‌ساز تدارک دیده نشود، برای مواجه نشدن با مشکلات فلیکر، ظرفیت اتصال کوتاه کوره باید حداکثر $\frac{1}{60}$ برابر ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه انتخاب شود.

با معکوس کردن نامساوی (18) خواهیم داشت:

$$\frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} \leq 0.02 \quad (19)$$

نامساوی فوق، یادآور همان تعریف کمیت SCVD می‌باشد که در قسمت دوم مطرح شده است. بیان معادل برای معیار ارزیابی مطرح شده این است که مقدار SCVD باید حداکثر برابر با 0.02 شود. درستی این معیار با آنچه در روش SCVD و شکل (14) از قسمت دوم مطرح شده نیز تأیید می‌گردد. چرا که در شکل (14)، $SCVD = 0.02$ نقطه مرزی است و $SCVD \leq 0.02$ کاملاً در ناحیه غیرقابل اعتراض قرار می‌گیرد.

در صورتی که از تجهیزات جبران‌ساز استفاده شود، معیار مطرح شده (1) مطابق رابطه (20) بازسازی می‌شود:

$$\frac{S_{ccn}}{S_{ccf}} \geq \frac{60}{R_{comp.}} \quad (20)$$

همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، با فن‌آوری فعلی، حداکثر می‌توان به $R_{comp.} = 3$ دست یافت. بر این اساس، می‌توان از کوره‌ای با ظرفیت $\frac{1}{20}$ ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه بهره‌برداری کرد، به شرطی که با استفاده از فن‌آوری پیشرفته، حداکثر میزان جبران‌سازی ممکن، محقق شود.

در مورد کارخانه فولاد آلیاژی ایران، با در نظر گرفتن قانون مکعبات برای یافتن ظرفیت کوره معادل و ظرفیت اتصال کوتاه 1390 مگاوات آمپر برای شینه تغذیه مطابق آنچه که خود پیمانکار در نظر گرفته، نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{S_{ccn}}{S_{ccfeq}} \geq \frac{1390}{70.95} = 19.59$$

این نتیجه با توجه به شکل (14) در قسمت دوم نشان می‌دهد که صرفاً با بهره‌گیری از جدیدترین فن‌آوری و تحقق حداکثر میزان جبران‌سازی، فلیکر ایجاد شده تقریباً در مرز ناحیه غیرقابل اعتراض قرار خواهد گرفت. بنابراین حتی اگر نتوان گفت که ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه جوابگوی کارخانه فولاد آلیاژی ایران با آرایش در نظر گرفته شده برای کوره‌های قوس نیست، اما حداقل می‌توان بر این نکته تأکید کرد که حاشیه امنیت چندانی هم رعایت نشده است.

در جدول (6)، برخی از نتایج اندازه‌گیری P_{st} در تعدادی از تأسیساتی که توسط پیمانکار در کشورهای مختلف نصب شده است، مشاهده می‌شود.

ردیف	ولتاژ اندازه گیری (kV)	S_{ccn} (MVA)	S_{ccf} (MVA)	P_{st}	
				S_{ccn}	S_{ccfeq}
۱*	۱۳۰	۳۰۰۰	۴۳	۶۹	۱/۵
۲*	۲۱۵	۲۴۹۰	۵۰	۴۹/۸	۲/۳
۳*	۱۳۰	۲۵۰۰	۲×۶۶	۵۴/۱۲	۱/۵
۴*	۳۳۰	۲۲۰۰	۲×۷۵	۲۳/۲۸	۴/۸
۵*	۲۲۰	۲۰۰۰	۲۲	۹۰/۹۱	۱/۱
۶*	۱۳۸	۹۷۵	۲×۴۸	۱۶/۱۲	۲/۳
۷	۱۳۰	۱۴۰۰	۴۸	۲۹/۱۷	۲/۳
۸	۱۲۷	۱۵۵۰	۲×۲۱	۵۸/۵۸	۲/۵
۹	۲۲۰	۲۶۰۰	۲۲	۱۱۸/۱۸	۱/۴
۱۰	۶۳	۶۱۰	۱۴	۴۳/۵۷	۲/۵

جدول (6) نتایج اندازه‌گیری P_{st} به همراه سایر مشخصات در تعدادی از تأسیسات نصب شده توسط پیمانکار

در مورد ردیف 3، ظرفیت‌های مشابه کوره‌های قوس در کارخانه فولاد آلیاژی ایران مشاهده می‌شود، اما مقدار قابل قبول و پایین P_{st} در شرایطی به دست آمده که ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه حدود 3.24 برابر مورد نظیر در کارخانه فولاد آلیاژی ایران است.

در مورد ردیف 6، حتی با وجود جبران‌ساز هم به دلیل پایین بودن نسبت $\frac{S_{ccn}}{S_{ccf}}$ مقدار P_{st} اندازه‌گیری شده نسبتاً بالاست مقدار متوسط نسبت در میان 10 مورد بالا برابر با 55.27 به دست می‌آید که حدوداً 2.5 برابر مورد نظیر در کارخانه فولاد آلیاژی ایران است.

در جدول فوق، موارد مشخص شده با * به SVC مجهز هستند.

• انتخاب ظرفیت جبران‌ساز

همان‌گونه که قبلاً نیز تصریح شد، افزایش ظرفیت SVC تا هر میزان دلخواه، الزاماً به کاهش سطح اغتشاشات منجر نخواهد شد. مؤثرترین مقدار ظرفیت SVC در محدوده 1.3 تا 1.5 برابر ظرفیت نامی کوره بیان شده است. با توجه به ظرفیت‌های نامی 30 و 10 مگاوات آمپر به ترتیب برای کوره‌های EAF و LF و در نظرگیری قانون مکعبات برای یافتن ظرفیت نامی کوره معادل، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب ظرفیت مناسب SVC تقریباً در فاصله [58 و 50] مگاوار قرار می‌گیرد. با مقایسه این

محدوده با ظرفیت 100 مگاوار که پیمانکار برای کارخانه فولاد آلیاژی ایران در نظر گرفته، می‌توان چنین برداشت کرد که انتخاب SVC با این ظرفیت، حتی فراتر از حد انتظار می‌باشد و در واقع با توجه به ترکیب بندی کوره‌های قوس، امکان جبران‌سازی بیشتر از طریق انتخاب SVC با ظرفیت بالاتر وجود ندارد. در جدول (7)، برخی از مشخصه‌های کارخانه فولاد آلیاژی ایران با تعدادی از تأسیسات فولاد در سایر نقاط دنیا که از جدول (3) قسمت دوم استخراج شده، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

در موارد 1 و 2، ضمن اینکه ظرفیت اتصال کوتاه به نسبت کوره‌های استفاده شده مقدار مناسبی است، نسبت S_{SVC}/S_{feq} نیز در محدوده مؤثر می‌باشد و در نتیجه مقادیر $P_{st\%99}$ نسبتاً پایین و قابل قبول می‌باشند. در مورد 3، ضمن اینکه SVC مناسبی انتخاب شده اما ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه جوابگوی کوره 96 مگاوات آمپری نیست. در مورد 4، هر دو عامل پایین بودن نسبی ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه و خصوصاً انتخاب نامناسب و غیرمؤثر ظرفیت SVC، دلیل مقدار بالای $P_{st\%99}$ بوده است. بهترین نتیجه ممکن در میان موارد مشخص شده در جدول (7)، مورد شماره 5 است که ضمن بالا بودن نسبی ظرفیت اتصال کوتاه، مقدار مناسبی حتی بالاتر از محدوده مؤثر برای SVC انتخاب شده است و منجر به نتیجه ایده‌آل $P_{st\%99} = 0.6$ شده است. در موارد 1 و 6 تقریباً ظرفیت‌های مشابهی برای کوره‌های قوس انتخاب شده و نتایج شدت فلیکر مشابهی نیز حاصل شده است. در مورد 1 ظرفیت اتصال کوتاه تنها 26 درصد کمتر از مورد شماره 6 است اما مشاهده می‌شود که انتخاب SVC با ظرفیت حدود 3 برابر، قادر به جبران این کمبود شده است. این نتیجه تأکیدی است بر این نکته که ظرفیت SVC شبیه عامل ظرفیت اتصال کوتاه شینه تغذیه، تأثیر خطی مستقیمی بر میزان شدت فلیکر ندارد. در هر صورت بالاترین مقدار ظرفیت SVC در میان موارد جدول (7)، مورد کارخانه فولاد آلیاژی ایران می‌باشد. طبق مطالب بالا، می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت مناسبی برای SVC کارخانه فولاد آلیاژی ایران در نظر گرفته شده است.

بررسی اثر اغتشاشی بخش نورد

برای مقدار تضمین شده شدت فلیکر در شینه کوپلاژ مشترک 230 کیلوولت، مطلبی در رابطه با فعالیت بخش نورد و همچنین موتورهای سایر بخش‌های کارخانه، در مجموعه شرایط و پیش‌فرض‌های پیمانکار مطرح نشده است. از این مطلب می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که یا از فعالیت بخش‌های فوق صرف‌نظر شده و یا واقعاً فعالیت مجموعه این بخش‌ها تأثیر چندانی بر شدت فلیکر ندارد. برای آزمون نتیجه‌گیری دوم، اثرات اغتشاشی مجموعه نورد از طریق انجام یک سری مطالعات موردی مورد

بررسی قرار گرفت. به دلیل در اختیار نداشتن نحوه عملکرد و نیز فرکانس راهاندازی موتورهای نورد که در شکل (19) با اسامی M1 تا M9 مشخص شده‌اند، برای آنها 10 حالت کاری و برای هر حالت 5 فرکانس راهاندازی مختلف در نظر گرفته شد. بدترین حالت کاری در نظر گرفته شده، راهاندازی همزمان تمامی موتورهای بخش نورد سنگین و سبک و بهترین حالت در نظر گرفته شده، راهاندازی حداقل یک موتور سنکرون 5.4 مگاواتی از بخش نورد سنگین یا دو موتور سنکرون 2.7 مگاواتی از هر یک از بخش‌های نورد سنگین و سبک بوده است.

کارخانه فولاد آلیاژی ایران	مورد شماره ۶	مورد شماره ۵	مورد شماره ۴	مورد شماره ۳	مورد شماره ۲	مورد شماره ۱	نام متغیر
۱۳۹۰	۶۶۰۰	۶۴۰۰	۱۱۵۰	۲۹۳۰	۲۷۰۰	۴۹۰۰	$S_{ccn}(MVA)$
۳۸/۲۶	۱۰۰	۷۰	۴۷	۹۶	۴۳	۹۶	$S_{feq}(MVA)$
۱۰۰	۳۰	۱۴۰	۱۹/۷۴	۱۱۰/۴	۶۰/۲	۱۱۰/۴	$S_{svc}(MVA)$
۲/۶	۰/۳	۲	۰/۴۲	۱/۱۵	۱/۴	۱/۱۵	S_{svc}/S_{feq}
-	۱/۲۹	۰/۶	۵/۶	۳/۴۹	۱/۵۴	۱/۲۶	$P_{st\%99}$

جدول (8) مقایسه برخی از مشخصه‌های کارخانه فولاد آلیاژی ایران با تأسیسات مشابه در سایر

نقاط دنیا

به دلیل آنکه مشخصات کامل موتورها در اختیار نبود، برای تخمین اثرات اغتشاشی آنها در شینه کویلاژ مشترک، فرض شد که در لحظه راهاندازی 6 برابر توان نامی خود را جذب کنند. همچنین برای موتورهای AC، ضریب توان متوسط 0.85 در نظر گرفته شد. از آنجایی که راهاندازی عمدتاً برای موتورهای بخش‌های نورد مطرح است و موتورهای سایر بخش‌ها که معادل آنها در شکل (19) با M10، M11 و M12 مشخص شده، بیشتر در ارتباط با کار دائم کوره‌ها می‌باشند، راهاندازی آنها در شبیه‌سازیهای انجام شده مورد توجه قرار نگرفت و صرفاً ظرفیت نامی آنها در نظر گرفته شد. روند شبیه‌سازیها به این صورت بوده است که ابتدا موتورهای در نظر گرفته شده در هر حالت، قطع فرض شده و در این حالت، ولتاژ شینه کویلاژ مشترک به دست آمده است. سپس در مرحله بعد، موتورهای راهاندازی شده و در لحظه راهاندازی، ولتاژ جدید به دست آمده است. از روی نتایج حاصل در هر دو مرحله و به ازای دو سطح اتصال کوتاه 1390 و 1566 مگاوات آمپر، درصد نوسان ولتاژ شینه کویلاژ مشترک به دست آمد. با توجه به فرکانس‌های راهاندازی و ضرایب تصحیح مربوط $(g(f))$ ، معادل 8

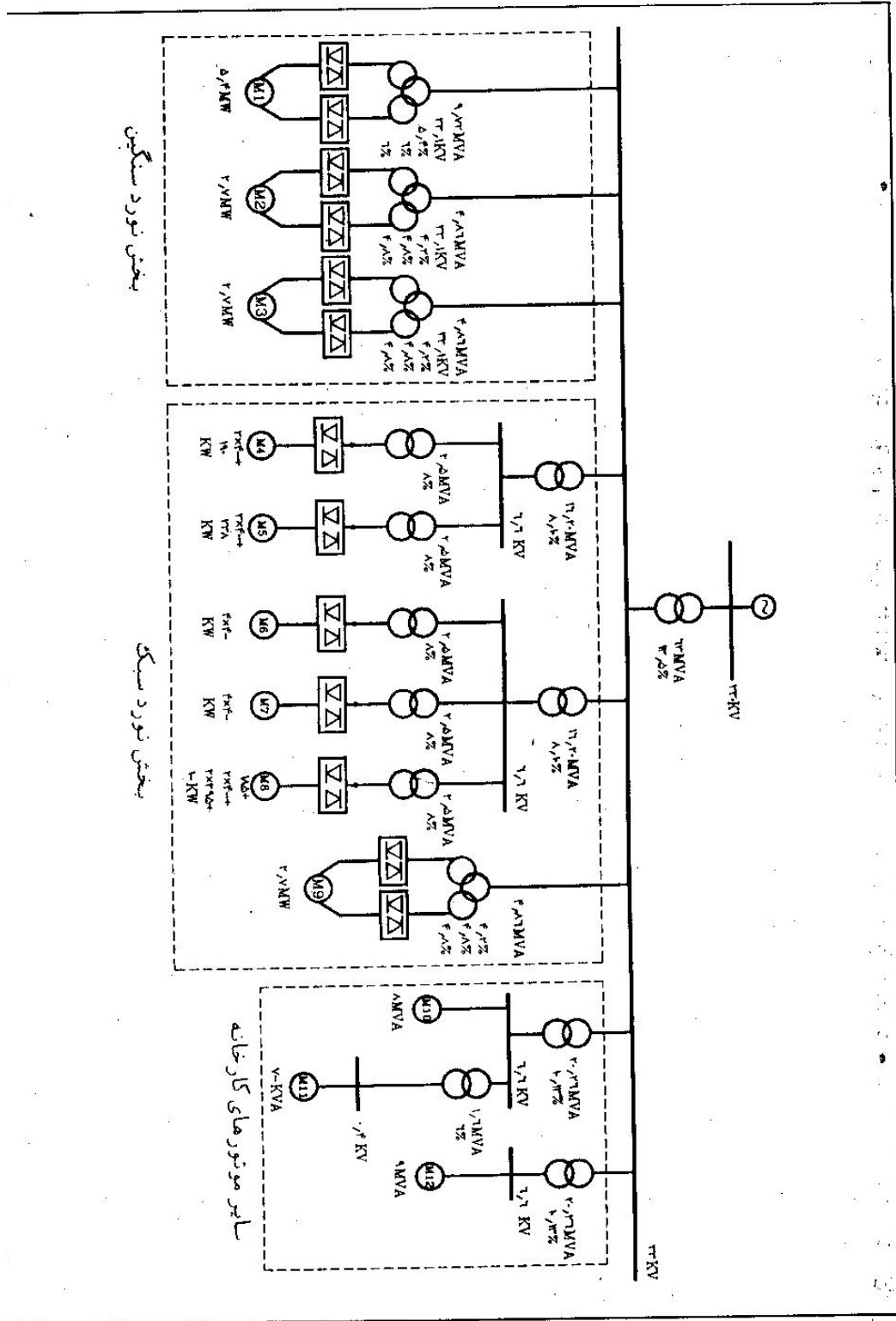
هرتزی نوسانات ولتاژ ایجاد شده نیز بر اساس مفاهیمی که در قسمت اول مطرح شده، محاسبه گردید که نتایج آن در جدول (9) مشاهده می‌شود.

با توجه به جدول (9) و مقایسه مقادیر 0.24 و 0.28 (نقطه کمینه منحنی شکل (13) در قسمت اول) نتیجه می‌شود که حتی در بهترین حالت در نظر گرفته شده نیز فلیکر ناشی از فعالیت بخش نورد در نزدیکی آستانه احساس قرار می‌گیرد و این خود تأکیدی است بر غیرقابل توجیه بودن صرفنظر از فعالیت بخش نورد در فلیکر نهایی شینه کویلاژ مشترک. گرچه سعی شده که در میان 10 حالت در نظر گرفته شده، حالت‌های محتمل بهره‌برداری لحاظ گردد، اما اگر در عمل، نتیجه‌ای غیر از نتایج این شبیه‌سازیها حاصل شود، این نشان می‌دهد که شرایط بهره‌برداری از بخش‌های نورد مغایر با مجموعه مفروضات و شرایط در نظر گرفته شده برای انجام این مطالعات بوده است.

انتخاب استاندارد

همان‌گونه که در قسمت اول مطرح شد، سه سطح «مشخصه ولتاژ»، «سطح سازگاری» و «سطح طراحی» برای فلیکر تعریف شده است. در مورد کارخانه فولاد آلیاژی ایران، چون اتصال یک سیستم به سیستم جامع‌تر و کلی‌تر مطرح است، بنابراین معیار تعیین حد مجاز فلیکر، سطح طراحی سیستم جامع شبکه برق ایران می‌باشد. چرا که کارخانه فولاد آلیاژی ایران تنها به عنوان یکی از سیستم‌های تولیدکننده فلیکر مطرح است و ترکیب فلیکر آن با فلیکر ناشی از سایر تولیدکنندگان فلیکر در شبکه، نهایتاً می‌تواند برابر با مشخصه ولتاژ گردد. در واقع اگر معیار، سطح طراحی شبکه سراسری در نظر گرفته شود، فاصله میان سطح طراحی و مشخصه ولتاژ، حاشیه امنیتی خواهد بود که باعث می‌گردد با توسعه سیستم و وجود سایر بارهای اغتشاشی، مسأله فلیکر تهدیدکننده نباشد.

در زمان انجام مطالعه فلیکر کارخانه فولاد آلیاژی ایران، استاندارد مصوبی برای سطح طراحی در دسترس نبود و به ناچار باید معیار دیگری برای استاندارد فلیکر در نظر گرفته می‌شد. این معیار می‌توانست «سطح سازگاری» یا «مشخصه ولتاژ» باشد. اما از آنجا که «مشخصه ولتاژ» حداکثر میزان مجاز فلیکر در شبکه است، اگر به‌عنوان حد مجاز فلیکر در نظر گرفته می‌شد، با گسترش شبکه و افزایش بارهای مسبب فلیکر، سطح فلیکر موجود در شبکه نیز افزایش یافته و در نتیجه باعث غیرمجاز شدن فلیکر در شبکه می‌شد.



شکل (19) دیاگرام تک خطی نمایانگر نحوه اتصال موتورهای بخش‌های مختلف

بنابراین پیشنهاد ما انتخاب معیار «سطح سازگاری» به عنوان حد مجاز فلیکر بود. «سطح سازگاری» در استاندارد IEC 1000 برای شبکه‌های فشار ضعیف و متوسط تعریف گردیده و برای تعیین آن در شبکه‌های فشار قوی مطابق آنچه در جدول (10) مشاهده می‌شود، از ضریب تضعیف فلیکر استفاده می‌گردد.

		$\frac{\Delta V}{V} \%$									
فرکانس راه‌اندازی		دقیقه/۱۰		دقیقه/۶		دقیقه/۳		دقیقه/۱		ساعت/۳۰	
ضریب تصحیح g(f)		۰/۷۸		۰/۷۵		۰/۷۲		۰/۱۸		۰/۱۶	
ظرفیت اتصال کوتاه شینه تندیه (MVA)		۱۳۹۰	۱۵۶۶	۱۳۹۰	۱۵۶۶	۱۳۹۰	۱۵۶۶	۱۳۹۰	۱۵۶۶	۱۳۹۰	۱۵۶۶
ترکیب بندی در نظر گرفته شده											
نورد سبک	نورد سنگین										
۱	M_A تا M_F	M_P, M_V, M_A	۱/۵۰	۱/۳۴	۱/۳۴	۱/۱۹	۱/۱۸	۱/۰۵	۰/۹۶	۰/۸۶	۰/۷۶
۲	M_A, M_A, M_A, M_F	M_P, M_V, M_A	۱/۳۵	۱/۲۰	۱/۲۱	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۹۵	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۶۹
۳	$M_A, M_A, -M_F$	M_P, M_V, M_A	۱/۲۷	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۰۱	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۷۳	۰/۶۴
۴	M_A, M_A, M_V, M_F	$M_P, -M_A$	۱/۱۴	۱/۰۲	۱/۰۲	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۷۳	۰/۶۵	۰/۵۸
۵	$M_A, M_A, -M_F$	$M_P, -M_A$	۱/۰۶	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۸۳	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۶۱	۰/۵۴
۶	$M_A, M_A, -$	$M_P, -M_A$	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۷۰	۰/۶۴	۰/۵۷	۰/۵۱
۷	$M_A, M_A, -M_F$	$-M_A$	۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۵۹	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۴۳
۸	$M_A, M_A, -$	$-M_A$	۰/۷۸	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۳۹
۹	$M_A, M_A, -$	$M_P, -$	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۲۸
۱۰	$M_A, -$	$M_P, -$	۰/۴۶	۰/۴۱	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۲۴

جدول (9) درصد نوسان ولتاژ معادل 8 هرتزی شینه تغذیه، ناشی از موتورهای بخش‌های نورد سنگین و سبک و نیز سایر بخش‌ها به ازای حالت‌ها و فرکانس‌های مختلف راه‌اندازی بر اساس جدول (10) اگر فرض شود که ضریب تضعیف فلیکر در شبکه ایران در محدوده 0.6 تا 0.8 باشد، مقدار استاندارد شدت فلیکر در شینه 230 کیلوولت که می‌تواند مبنای مقایسه قرار گیرد در محدوده 1.25 تا 1.67 خواهد بود.

شاخص	سطح سازگاری در MV	سطح سازگاری در HV		
		ضریب تضعیف فلیکر از HV به LV		
		۰/۶	۰/۷	۰/۸
P_{st}	۱/۰	۱/۶۷	۱/۴۳	۱/۲۵
P_{lt}	۰/۸	۱/۳۳	۱/۱۴	۱/۰

جدول (10) مقادیر استاندارد «سطح سازگاری»

یکی از اشکالاتی که در فرضیات پیمانکار مطرح می‌شود، معیار قرار دادن استاندارد CENELEC EN50160 می‌باشد. این نشان می‌دهد که به اشتباه «مشخصه ولتاژ» به عنوان حد مجاز فلیکر مورد توجه قرار گرفته است. این فرض تنها در صورتی معتبر است که کارخانه فولاد آلیاژی ایران تنها تولیدکننده فلیکر در شبکه سراسری ایران باشد و هیچ توسعه‌ای نیز در آینده صورت نگیرد. البته حتی با این فرض نادرست نیز مقدار تضمین شده $P_{st\%95} = 1.53$ چندان دور از واقع نیست و با مقادیر فاصله [1.67 و 1.25] قابل مقایسه است.

نتایج اندازه‌گیری شده توسط پیمانکار فرعی

در ساعت 30:14 مورخ 78/3/1، ظرفیت اتصال کوتاه شینه کویلاژ مشترک 230 کیلوولت به تقریب در فاصله 1315 تا 1766 مگاوات آمپر و در ساعت 50:07 مورخ 78/3/2، در فاصله 1537 تا 1691 مگاوات آمپر اندازه‌گیری شده است. میانگین این نتایج به دست آمده، به مقداری که از شبیه‌سازی معلوم گردید (1566 مگاوات آمپر) بسیار نزدیک است.

برای دستیابی به میزان فلیکر شینه 230 کیلوولت تغذیه، جدای از فعالیت کارخانه، مرحله اول اندازه‌گیری فلیکر در شرایطی انجام شده است که کلیه بخش‌های کارخانه اعم از کوره، نورد و SVC از مدار خارج بوده‌اند. بر اساس 48 نمونه P_{st} (از ساعت 16:05 تا 23:55 مورخ 78/3/1) و 4 نمونه P_{It} (از ساعت 05:16 تا 05:22) نتایج زیر استخراج می‌شود:

$$P_{stmax}(\text{شبکه}) = 0.386$$

$$P_{st\%95}(\text{شبکه}) = 0.319$$

$$P_{Itmax}(\text{شبکه}) = 0.279$$

در روز بعد (مورخ 78/3/2)، در شرایطی که هر دو کوره EAF به طور همزمان فعال بوده و SVC نیز در مدار بوده است، مرحله دوم اندازه‌گیری در شینه 230 کیلوولت از ساعت 05:00 آغاز و تا 25:14 ادامه یافته است. فعالیت همزمان کوره‌های EAF در گزارش اندازه‌گیری که به امضای نمایندگانی از پیمانکار اصلی و فرعی، کارخانه فولاد و برق منطقه‌ای رسیده است، تصریح شده است. علاوه بر این طبق اظهار یکی از مسئولین کارخانه، بخش نورد نیز در مدت زمان اندازه‌گیری در حال فعالیت بوده

است. بر اساس 87 نمونه P_{st} و 7 نمونه P_{lt} که در مدت زمان اندازه‌گیری به دست آمده است، نتایج زیر استخراج می‌شود:

$$P_{stmax} = 2.341$$

$$P_{st\%95} = 1.889$$

$$P_{ltmax} = 1.569$$

اندازه‌گیری فلیکر در شینه 33 کیلوولت نورد برخلاف اندازه‌گیری در شینه 230 کیلوولت، در یک روز انجام شده است. به همین دلیل دقیقاً مقادیر P_{st} و P_{lt} ذاتی مربوط به این شینه که از شبکه در آن منعکس می‌شود، قابل تشخیص نیست. حداقل، مقادیر بیشینه و 95 درصد را نمی‌توان دقیقاً مشخص کرد. اما در گزارش نتایج اندازه‌گیری، برای P_{lt} ذاتی شینه نورد، مقدار 0.332 در نظر گرفته شده است. با دقت در نتایج اندازه‌گیری P_{st} در این شینه که مربوط به تاریخ 78/3/3 است، کمترین مقدار برابر با 0.226 مشخص می‌شود. به ناچار همین مقدار به عنوان P_{st} ذاتی این شینه در نظر گرفته می‌شود. بر اساس 38 نمونه P_{st} که از ساعت 10:45 تا 16:55 مورخ 78/3/3 به دست آمده و نیز 3 نمونه P_{lt} از ساعت 10:45 تا 14:45 همان روز، نتایج زیر استخراج می‌شود:

$$P_{stmax} = 1.915$$

$$P_{st\%95} = 1.862$$

$$P_{ltmax} = 1.157$$

در رابطه با نتایج اندازه‌گیری فلیکر نکات زیر قابل طرح است:

1- سطح اتصال کوتاه شینه تغذیه: یکی از پیش‌فرض‌های اساسی در نظر گرفته شده برای تضمین مقادیر شدت فلیکر در شینه‌های 230 و 33 کیلوولت، سطح اتصال کوتاه 1390 مگاوات آمپر در شینه کوپلاژ مشترک بوده است. مطالعات کامپیوتری بر روی شبکه ایران نشان داد که این رقم به 1566 مگاوات آمپر ارتقاء یافته است. اندازه‌گیری‌های انجام شده نیز این نتیجه را تأیید می‌کند. بر این اساس به نسبت 1390/1566 یعنی حدود 0.88 آنچه قبلاً توسط پیمانکار تضمین شده باید در عمل محقق شود. به عبارت دیگر اگر مقادیر تضمینی در شینه 230 کیلوولت، $P_{st\%95} \leq 1.53$ و $P_{lt\%95} \leq 1.3$ بوده است، در وضعیت فعلی با توجه به بهبود سطح اتصال کوتاه، باید نتایج $P_{st\%95} \leq 1.36$ و $P_{lt\%95} \leq 1.15$ حاصل شوند. (برای سایر سطوح ولتاژ نیز این موضوع صادق است).

2- مدت زمان اندازه‌گیری: در استانداردهای IEC868 و CENELEC EN 50160، حداقل مدت زمان اندازه‌گیری، یک هفته مشخص شده است. در طول یک هفته، اگر حوادثی نظیر صاعقه یا اتصال کوتاه رخ دهد و در نتیجه باعث شوند که چند مقدار بزرگ در نمونه‌های P_{st} ظاهر شود، با توجه به اینکه سطح احتمالاتی 95 درصد برای P_{st} و P_{lt} در نظر گرفته می‌شود، آن چند مقدار بزرگ تأثیری در شاخص‌های $P_{st\%95}$ و $P_{lt\%95}$ نخواهند داشت. اندازه‌گیری‌های انجام شده در کارخانه فولاد آلیاژی ایران در یک روز و یا حداکثر دو روز انجام شده است که این خود تخطی از استاندارد مورد توافق (CENELEC) می‌باشد. با این وجود چون مدت زمان اندازه‌گیری کوتاه بوده است، عملاً شانس برای بروز حوادثی از قبیل صاعقه و ... وجود نداشته و عملاً تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان مقادیر $P_{st\%95}$ و $P_{lt\%95}$ (با P_{stmax} و P_{ltmax}) وجود نخواهد داشت. همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید، این تفاوت حداکثر در حد 0.1 تا 0.2 است و جالب اینکه در گزارش اندازه‌گیری پیمانکار فرعی، به همین اختلاف نیز توجهی نشده و عملاً همان مقادیر بیشینه ملاک قرار گرفته‌اند.

3- شرایط بهره‌برداری: عملکرد بهینه کوره‌ها مطابق دیاگرام شکل (18) و آماده به کار بودن بخش نورد از جمله پیش‌فرض‌های تضمین مقادیر P_{st} و P_{lt} در شینه‌های 230 و 33 کیلوولت بوده است. اما اندازه‌گیری در شرایطی کاملاً متفاوت با آنچه در مکاتبات قبلی کارفرما و پیمانکار مطرح شده بود، انجام شده است. این موضوع مقایسه نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری و مقادیر وعده داده شده را با مشکل مواجه می‌کند.

4- در نظر گرفتن نوسانات ولتاژ ذاتی شبکه: برای اینکه منحصراً اثر اغتشاشی کارخانه معلوم شود، در گزارش اندازه‌گیری پیمانکار فرعی، نتایج اندازه‌گیری‌ها مراحل 1 و 2 به سادگی از هم کم شده‌اند. به‌عنوان نمونه در شینه 230 کیلوولت، محاسبات زیر انجام شده است:

$$P_{stmax} (\text{ناشی از کارخانه}) = 2.341 - 0.386 = 1.955$$

$$P_{st\%95} (\text{ناشی از کارخانه}) = 1.889 - 0.319 = 1.57$$

$$P_{ltmax} (\text{ناشی از کارخانه}) = 1.569 - 0.279 = 1.29$$

اشکالاتی که در این زمینه مطرح می‌شود این است که محاسبات بالا تنها زمانی توجیه پیدا می‌کند که نوسانات ولتاژ ذاتی شبکه و نوسانات ولتاژ ناشی از کارخانه کاملاً همزمان رخ دهند که چنین وضعیتی کاملاً بعید است. به نظر می‌رسد که کم کردن مقادیر P_{st} و P_{lt} ذاتی خود شبکه از مقادیر اندازه‌گیری شده، تلاشی برای تحقق مقادیر وعده داده شده بوده است، حال آنکه در مکاتبات قبلی

اشاره‌ای به فلیکر ذاتی خود شبکه نشده بود. نکته قابل توجه اینکه چون مقادیر مربوط به شبکه به اشتباه به طور مستقیم از مقادیر اندازه‌گیری شده کاسته شده است، در نظرگیری نوسانات ولتاژ ذاتی شبکه بسیار مفید فایده واقع شده است.

به دلیل آنکه احتمال همزمانی نوسانات ولتاژ ذاتی شبکه و کارخانه کم است، پیشنهاد می‌شود که برای دستیابی به شاخص‌های شدت فلیکر خود کارخانه، از قانون مکعبات استفاده شود. بنابراین نتایج منطقی‌تری که از اندازه‌گیری‌های به عمل آمده می‌توان استخراج کرد به صورت زیر خواهد بود:

در شینه 230 کیلوولت تغذیه:

$$P_{stmax}(\text{ناشی از کارخانه}) = \sqrt[3]{2.341^3 - 0.386^3} = 2.337$$

$$P_{st\%95}(\text{ناشی از کارخانه}) = \sqrt[3]{1.889^3 - 0.319^3} = 1.886$$

$$P_{ltmax}(\text{ناشی از کارخانه}) = \sqrt[3]{1.569^3 - 0.279^3} = 1.566$$

در شینه 33 کیلوولت نورد

$$P_{stmax}(\text{ناشی از کارخانه}) = \sqrt[3]{1.915^3 - 0.226^3} = 1.914$$

$$P_{st\%95}(\text{ناشی از کارخانه}) = \sqrt[3]{1.862^3 - 0.226^3} = 1.861$$

$$P_{ltmax}(\text{ناشی از کارخانه}) = \sqrt[3]{1.157^3 - 0.332^3} = 1.148$$

نتیجه

بررسی‌های انجام شده به منظور قضاوت نهایی درباره مجاز بودن فلیکر ناشی از کارخانه فولاد آلیاژی ایران، نشان می‌دهد که با وجود برخی نقاط ضعف از قبیل انتخاب استاندارد، برخی اشتباهات محاسباتی و عدم تطابق شرایط اندازه‌گیری با شرایط تضمین، پیمانکار از عهده انجام آنچه به او واگذار شده یعنی انتخاب و نصب جبران‌ساز مناسب، به خوبی برآمده است. نتایج اندازه‌گیری نیز با فرض کالیبره بودن دستگاه اندازه‌گیری، محقق شدن مقدار تضمینی شدت فلیکر در شینه 230 کیلوولت را ثابت می‌کند هر چند از سطح استاندارد بیشتر است. در سایر سطوح ولتاژ بخصوص شینه 33 کیلوولت نورد نیز، مقدار اندازه‌گیری شده برای شاخص کوتاه‌مدت شدت فلیکر بیش از مقدار استاندارد است که دلیل آن قابل توجه بودن اثر اغتشاشی بخش‌های نورد سنگین و سبک می‌باشد. مطالعه موردی انجام شده برای بخش نورد، نشان داد که اثر اغتشاشی معادل بخش نورد در بهترین و بدترین شرایط به ترتیب 20 تا 40 درصد شدت فلیکر فشار قوی می‌باشد.

مقایسه انجام شده با نمونه‌های در دسترس، نشان داد که به دلیل پایین بودن نسبی سطح اتصال کوتاه شینه تغذیه، این عامل توجیه‌کننده مناسبی برای نصب کارخانه در محل فعلی نبوده و به‌طور قطع عوامل دیگری در انتخاب این مکان مؤثر بوده‌اند.