

بررسی فلیکر در مزارع بادی و مدلسازی فلیکرسنج

بهمن خاکی

شرکت تأمین کیفیت صنعت

bahman.khaki@gmail.com

چکیده:

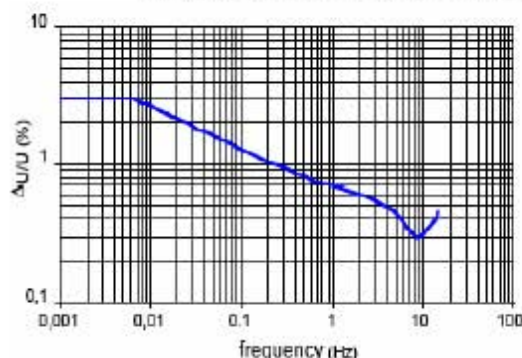
بررسی تغییرات توان و ولتاژ شبکه برق از اهمیت بالایی برخوردار است. به خصوص با اتصال نیروگاههای بادی و سایر انرژی های تجدید پذیر یا تولیدهای پراکنده به شبکه، اثرات متقابلی به وجود می آید، که بر اهمیت و پیچیدگی های آن افزوده است. به علاوه ساختار قابل کنترل توربین های بادی سرعت متغیر و به کارگیری المان های کنترل توان در اینورها و مبدلها، اثرات اضافه دیگری را به شبکه تحمیل می کنند. بحث کیفیت توان در اینجا در مورد شبکه شامل نیروگاه بادی صورت می گیرد، تغییرات توان و ولتاژ در چنین سیستم قدرتی با توجه به تغییرات غیرخطی باد، ترزیق هارمونیک و درون هارمونیک ها به واسطه استفاده از اینورها و مبدل ها در توربین های بادی سرعت متغیر، و بالاخره یکی از مهمترین بحث های کیفیت توان، که در این مقاله به آن پرداخته خواهد شد، یعنی فلیکر، به وجود می آید. محاسبه این موارد کیفیت توان نیازمند دستگاههای دقیقی است، که امروزه برای طراحی یک سیستم قدرت بهینه و چاره اندیشی بهنگام بحران ها و شرایط خاص به کمک برنامه ریزان شبکه می آید. در یک شبیه سازی کامل نیروگاه بادی، لازم است این مقادیر هارمونیک و فلیکر و سایر موارد کیفیت توان نیز محاسبه و نتایج بررسی شوند. در بخش دوم، پس از معرفی فلیکر، بخشهای مختلف مدلسازی یک دستگاه فلیکرسنج ارائه شده، و صحت عملکرد مدل نیز طی دو آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- مقدمه

در تعریف فلیکر آمده است، «سوسو کردن نور» یا در سیستم قدرت، تغییر توان در نقطه ای از شبکه که به دلائلی تغییرات ولتاژ دارد. این پدیده را هنگام افت توان شبکه، در لامپ های مصرفی ۶۰ یا ۱۰۰ ولت در منازل تجربه کرده ایم. مقداری از آن که برای انسان قابل ادراک است، توسط چشم و سپس رسیدن پیام به مغز احساس می شود، شکل (۱) نشان دهنده متحنی مشهوری است که همواره در بیان فلیکر بیان میگردد، که تغییرات ولتاژ را بر حسب محدوده فرکانسی که قابل ادراک برای چشم انسان است نشان می دهد، این

نمودار، متحنی فلیکر نامیده می شود و به طور تجربی با آزمایشات متعدد روی افراد و پاسخ انسان به محرک نور لامپ ۶۰ وات که متبع ولتاژی با شکل موج چهار گوش دارد، به دست آمده است. مقالات زیادی در این مورد نوشته شده است، که یکی از مهمترین مباحث کیفیت توان در سیستم های قدرت محسوب می شود. مطابق شکل چشم انسان تا محدوده فرکانسی (۱۶،۶۷-۱۰۰۰/۶۰) حساسیت بیشتری نشان می دهد، پس این محدوده وزن بیشتری را در مقدار فلیکر دارد.

تغییر توان اکتیو، توان راکتیو در توربین های بادی، یا کارکرد کلیدزنی توربین بادی، می تواند باعث فلیکر باشند. معمولاً تغییرات توان در محدوده ناشی از فلیکر، ۰/۵ تا ۳۵ هرتز می باشد، و توسط ۱- اغتشاش ۲- تغییرات برشی باد (Wind Shear) یا ۳- اثر سایه برج (tower shadow) ممکن است، به وجود آید.



شکل ۱: متحنی فلیکر: تغییرات دامنه ولتاژ بر حسب محدوده

فرکانسی قابل ادراک برای چشم انسان

در فرکانسهای بالاتر از یک هرتز، فرکانس عبور پره توربین بر طیف توان چیره شده و در آستانه پیدایش فلیکر به وجود می آید، که در شکل (۲) برای مثال، نمونه برداری از یک سیستم توربین بادی سرعت ثابت واقعی برای محاسبه مقدار فلیکر بر حسب توان پریونیت آن، بر پایه توان P_{rated} نشان داده شده است، که $P_{ff} = 1$ هنگامی رخ میدهد که تغییرات ولتاژ مطابق شکل (۱) باشد. مقدار واقعی فلیکر، علاوه بر مشخصه توربین بادی، به شبکه برق در نقطه اتصال توربین مزرعه بادی به شبکه، بستگی دارد.

و مطابق استاندارد IEC مقدار ۵۰ برای آن پیشنهاد شده و تغییر آن سطح لحظه‌ای فلیکر P_{st} را بر خلاف ثوابت فلیکر تغییر می‌دهد.

منظور از ثابت فلیکر $c(\psi_k)$ است، که تابعی است از ψ_k ، زاویه امپدانس شبکه فرضی، و با توجه به موارد زیر تعیین می‌شود:

- ۱- مقادیر جریان‌های خط و ولتاژهای فاز شبکه با فرکانس نمونه برداری ۱۶۰۰ هرتز، در فرکانس قطع (cut-off) حداقل ۴۰۰ هرتز.
 - ۲- اندازه‌گیری مقادیر جریان و ولتاژ در حداقل ده ثانیه.
- ثوابت فلیکر طی ده دقیقه انجام شبیه سازی با تعیین پارامترهای زیر، پیدا می‌شوند:

- محاسبه ولتاژ شبکه فرضی (u_{fic})

- تعیین مقدار لحظه‌ای فلیکر ($P_{f,fic}$)، برای توربین بادی متصل به شبکه فرضی به واسطه فلیکر سنج

- تعیین سطح فلیکر در حالت کوتاه مدت و گذرا ($P_{st,fic}$)

- محاسبه ثابت فلیکر به صورت زیر:

$$c(\psi_k) = P_{st,fic} \cdot \frac{S_{k,fic}}{S_n} \quad (2)$$

طراحی فلیکر سنج در محیط نرم افزار Matlab/Simulink توسط بلوک‌های ساختار کلی یک فلیکر سنج که در استانداردهای ۶۰۸۶۸ و ۱۵-۴-۶۱۰۰۰ ارائه شده است، صورت پذیرفته است.

۲- فلیکر سنج:

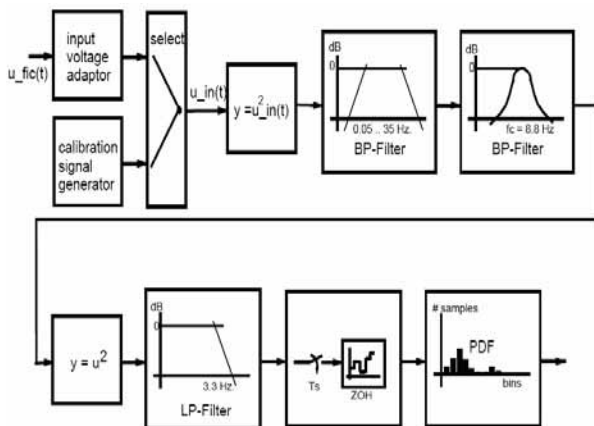
ساختار کلی چنین دستگاه آنالوگی که در استانداردهای نامبرده ارائه شده است، بر پایه پنج بلوک مطابق شکل ۴ است که عبارتند از:

- تطبیق دهنده ولتاژ و واحد تست کالیبراسیون، که اولی برای محدودسازی تغییرات به محدوده تغییرات فلیکر سنج، و دومی برای کنترل عملکرد صحیح دستگاه به کار رفته است.

- بلوک ۳ شبیه ساز سیستم فیلامان لامپ گازی ۶۰ وات تا ۲۳۰ وات است.

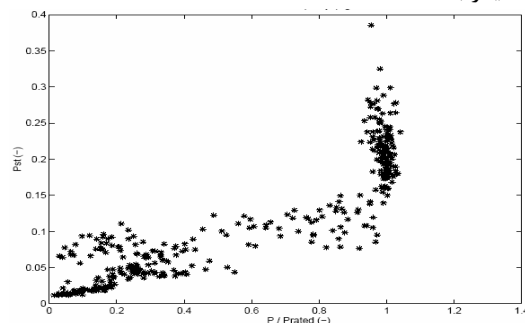
- بلوک ۴ محدوده فرکانسی قابل ادراک برای انسان را جدا می‌سازد.

- در نهایت بلوک ۵، سطوح فلیکر قابل ادراک برای انسان را طبقه‌بندی کرده و تابع چگالی احتمال این سطوح تولید می‌کند.



شکل ۴: بلوک دیاگرام یک دستگاه فلیکر سنج

در حالی که نسبت اتصال کوتاه بالا باعث کاهش سطح فلیکر می‌گردد، تغییرات توان واحدهای ژنراتوری دیگر نزدیک به آن و یا بارهای مصرفی متصل به نقطه مشترک، ممکن است افزایش دهنده سطح فلیکر باشد.



شکل ۲: سطوح فلیکر اندازه‌گیری شده (P_{st}) بر حسب توان

برای یک نمونه توربین سرعت ثابت

البته هدف از اندازه‌گیری فلیکر، بررسی نتایجی است که مستقل از شبکه برق متصل به آن باشد، بدین منظور استاندارد شماره ۲۱-۶۱۴۰۰ IEC کمسیون جهانی الکترونیک، روشی برای شبیه سازی تغییرات ولتاژ توسط یک شبکه فرضی مطابق مدار شکل (۳) ارائه می‌کند، که در بخش فلیکر سنج به طور خلاصه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳: شبکه برق فرضی برای ارزیابی فلیکر

این شبکه، شامل منبع ولتاژ ایده‌آلی با ولتاژ لحظه‌ای u_g معادل ولتاژ شبکه و یک امپدانس معادل شبکه، که شامل مقدار اهمی (R_{fic}) و مقدار القائی آن (L_{fic}) می‌باشد. توربین بادی نیز به طور ساده توسط منبع جریانی با مقدار i_m مدل شده است. منبع ولتاژ ایده‌آل نمایانگر دو مطلب ثابت بودن دامنه، که خود نشان دهنده عدم تاثیر و وجود فلیکر در ولتاژ شبکه فرضی (u_{fic}) است، و دوم زاویه لحظه‌ای بین ولتاژ در جریان شبکه فرضی، (α_m) برابر مقدار زاویه ولتاژ و جریان در نقطه مشترک اتصال به شبکه در نظر گرفته شده است. پس بایستی افت ولتاژ ناشی از امپدانس شبکه کوچک باشد. مقادیر اندازه و فاز ولتاژ با داشتن مولفه طولی و عرضی (q, d) ولتاژ در نقطه مشترک اتصال به شبکه با تبدیل به اندازه فاز تحقق می‌یابد، که طولانی‌تر از روش اول است. توان اتصال کوتاه سه فاز شبکه فرضی به صورت زیر است:

$$S_{k,fic} = \frac{u_n^2}{\sqrt{R_{fic}^2 + X_{fic}^2}} \quad (1)$$

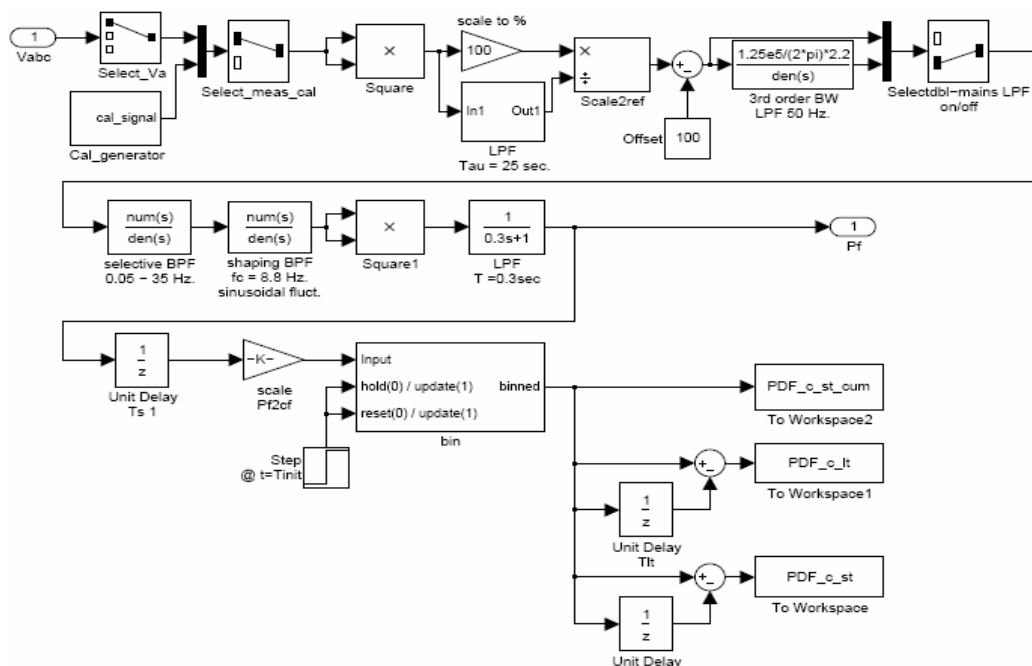
نسبت مناسب توان ظاهری نامی (S_n) به توان ظاهری اتصال کوتاه قدمی در صحت مقادیر P_{st} بدست آمده از فلیکر سنج است

در بلوک شماره ۲، سیگنال ورودی مجذور شده و مقدار پریونیت آن بر پایه سیگنال فیلتر پائین گذر، که مقدار سیگنال را به واحد نزدیک می‌کند بدست می‌آید، این فیلتر مرتبه یک است، و زمان نشست برابر ۶۰ ثانیه دارد، که برای کاهش این مقدار، فیلتر مطابق شکل (۷)، با سرعت ۱۰۰ برابر سریعتر کلیدزنی شده است. این بلوک شبیه فیلتر میان گذری از مرتبه ۲، با پهنای باند ۰/۵ هرتز تا ۳۵ هرتز، طراحی می‌شود، سپس سیگنال از فیلتر میانگذر دیگری با فرکانس مرکزی ۸/۸ هرتز، مطابق شکل (۱) عبور می‌کند،

یک بلوک اضافه دیگر که شبکه فرضی است، و در موردش پیشتر بحث شد، نیز با دریافت مقادیر جریان‌های خط و ولتاژهای فاز شبکه، ولتاژ لازم برای ورودی بلوک شماره یک را فراهم می‌سازد.

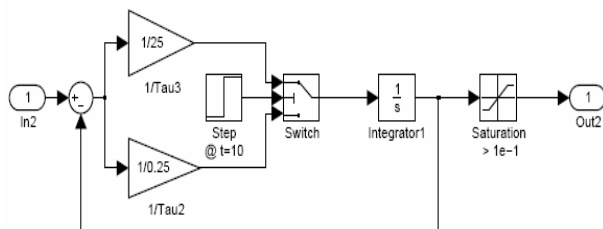
۳- شبیه سازی مدل در محیط نرم افزار :

در این بخش، چگونگی مدل سازی هر بلوک در محیط گرافیکی نرم افزار مورد بررسی قرار می‌گیرد، مدل دستگاه در شکل (۵) آمده است.



شکل ۵: صفحه اصلی مدلسازی شامل بلوکهای اصلی یک فلیکروسنج

و از یک فیلتر پائین گذر با ثابت زمانی ۳۰۰ میلی ثانیه می‌گذرد، سیگنال حاصل همان $P_f(\psi_k)$ است، همچنین برای دقت بیشتر یک فیلتر دیگر از نوع بوت-ورث مرتبه ۳ نیز به کار می‌رود، که بدون در نظرگیری آن سیگنال ورودی بدون فلیکر در غالب یک مقدار افست در سیگنال $P_f(\psi_k)$ ظاهر می‌شود که در حدود ۰/۸ در فرکانس ۶۰ هرتز و ۱/۲ در فرکانس ۵۰ هرتز خواهد بود.



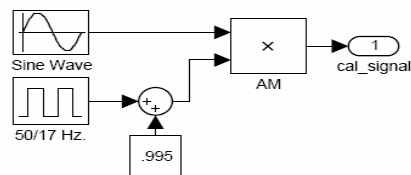
شکل ۷: مدل فیلتر پائین گذر (LPF) با به کارگیری کلید برای تغییر ثابت زمانی

۳-۳ آنالیز داده‌ها (بلوک پنجم):

برای محاسبه ثوابت کوتاه مدت و بلندمدت فلیکر $c_{st}(\psi_k)$ و $c_{lt}(\psi_k)$ در مقدار خاصی از فاز شبکه (ψ_k) ، دو توابع چگالی

۳-۱- انتخاب ورودی و مولد سیگنال کالیبراسیون [بلوک ۱]

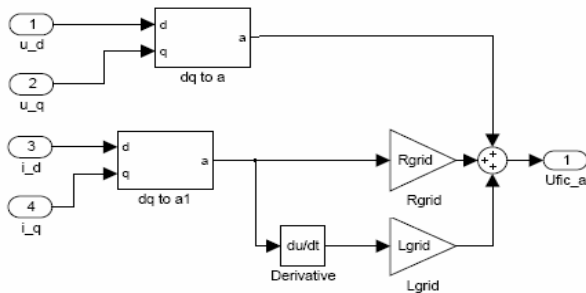
در این بلوک ولتاژ یکی از فازهای a یا b یا c توسط سلکتور انتخاب شده و سپس سیگنال کالیبراسیون که سینوسی و متناوب با فرکانس شبکه است، با مولد سیگنال دامنه (AM) مدوله می‌شود، مطابق شکل (۶) سیگنال مدوله کننده، موج مربعی با فرکانس (۵۰/۱۷) هرتز و دامنه یک صدم دامنه حامل سینوسی می‌باشد، که مطابق استاندارد باید سطح فلیکر خروجی آن، مقدار واحد باشد.



شکل ۶: مدل مولد سیگنال کالیبراسیون

۳-۲- مدل شبیه ساز تغییرات نور لامپ و ادراک آن توسط

چشم و مغز انسان: [بلوک ۲ و ۳ و ۴]



شکل ۱۰: مدل شبکه فرضی

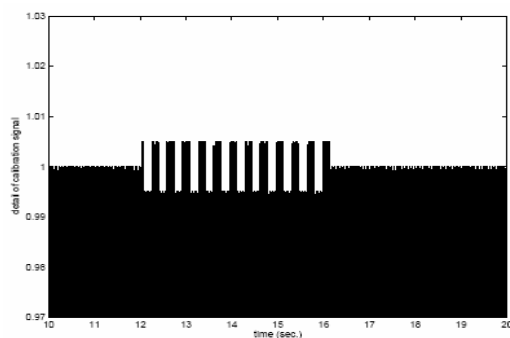
مقدار ثابت کوتاه مدت فلیکر، با احتمال $P[x < c_{st,i}(\psi_k)]$ به دست می آید، که $c_{st}(\psi_k)$ ثابت حداقلی است که نتیجه احتمال به ازای آن برابر یا بزرگتر از ۹۹ درصد است .

۴- آزمایش مدل طراحی شده:

در این بخش صحت عملکرد فلیکرسنج شبیه سازی شده را ابتدا با یک سیگنال ورودی کالیبراسیون بررسی کرده، و سپس عملکرد آن را برای یک شبکه واقعی شبیه سازی شده شامل توربین بادی با ژنراتور القایی سرعت متغیر و به همراه ترانسفورماتورها و خط انتقال بررسی کرده، و مقدار فلیکر و پارامترهای مربوط به آن را در شینه اتصال مشترک نیروگاه بادی و شبکه برق بررسی می کنیم .

۴-۱- پاسخ به سیگنال ورودی کالیبراسیون:

سیگنال کالیبراسیونی دارای فرکانس ۵۰ هرتز با شکل موج سینوسی در نظر گرفته شده، که مدوله شده با مولاسیون دامنه (AM)، مطابق شکل (۶) باشد، همچنین با توجه به شکل (۱۱) سیگنال کالیبراسیون، در t برابر ۱۲ ثانیه، با بسته شدن کلید، اعمال و در t برابر ۱۶ ثانیه با باز شدن کلید، غیرفعال می شود، پاسخ فلیکرسنج به سیگنال کالیبراسیون در شکل (۱۲) آمده است،



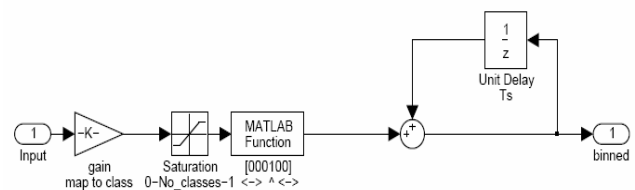
شکل ۱۱: سیگنال کالیبراسیون با مدولاسیون دامنه (AM)

که نتیجه موردنظر ما که مقدار خروجی تقریبی واحد بود، مطابق شکل با کمی نوسان پاسخ حول مقدار یک تحقق یافته است .

احتمالی تجمعی به ترتیب در پریود ۶۰ ثانیه ای برای ثابت کوتاه مدت و پریود ۱۲۰ دقیقه ای برای تعیین ثابت بلندمدت، بدست می آوریم که در آن از سطح فلیکر لحظه ای $P_f(\psi_k)$ در هر ۲/۵ ثانیه نمونه برداری می شود و بر پایه توان اتصال کوتاه توربین بادی محاسبه می شود. ثابت فلیکر لحظه ای مطابق معادله زیر خواهد بود :

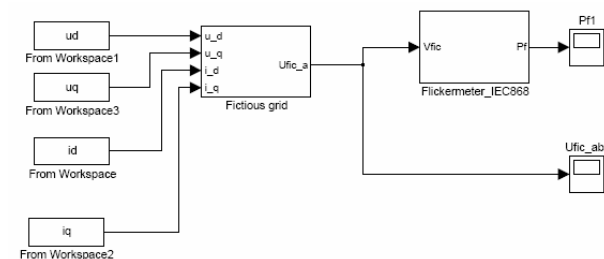
$$c_f(\psi_k) = P_f(\psi_k) \cdot \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (3)$$

که در آن $S_{k, fic}$ توان اتصال کوتاه شبکه فرضی و S_n توان نامی توربین بادی باشد و مجموع این ثوابت فلیکر لحظه ای، به صورت احتمال تجمعی در هر تناوب تکرار می شوند.



شکل ۸: نمونه برداری از سیگنال فلیکر

این نکته قابل ذکر است که برای دستیابی به چگالی احتمال تجمعی مجبور به خارج شدن از محیط گرافیکی simulink و نوشتن دستورات مربوط به آن در صفحه اصلی نرم افزار هستیم .



شکل ۹: محاسبات فلیکر با دریافت جریان و ولتاژ شبکه در ورودی

مدل شبکه فرضی که در شکل (۹)، به فلیکرسنج متصل شده است، در شکل (۱۰) آمده است. جریان های خط شبکه $I_m(t)$ به شبکه فرضی عاری از فلیکر و امپدانس اتصال کوتاه $(R_{grid} + j\omega L_{grid})$ تزریق می گردد و ولتاژ حاصل شده در شبکه فرضی به دست می آید:

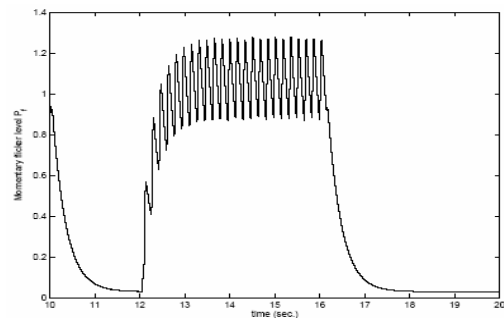
$$c_f(\psi_k) = P_f(\psi_k) \cdot \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (4)$$

که ولتاژ شبکه فرضی (u_{fic}) برای چهار مقدار فاز شبکه، ψ_k ، ۳۰ و ۵۰ و ۷۰ و ۸۵ درجه، توسط رابطه زیر محاسبه می گردد :

$$\psi_k = \arctg\left(\frac{\omega L_{grid}}{R_{grid}}\right) \quad (5)$$

جریان‌های خط اندازه گرفته شده در شینه B، به شبکه فرضی که برای محاسبه فلیکر لازم است، متصل می‌گردد. شبکه فرضی دارای امپدانس اتصال کوتاه ۲۵ مگاوات آمپری و فاز ۳۰ درجه‌ای در نظر گرفته شده، ورودی جریان $i_m(t)$ با فرض بزرگ بودن نسبی توان اتصال کوتاه شبکه فرضی، کوچک خواهد بود.

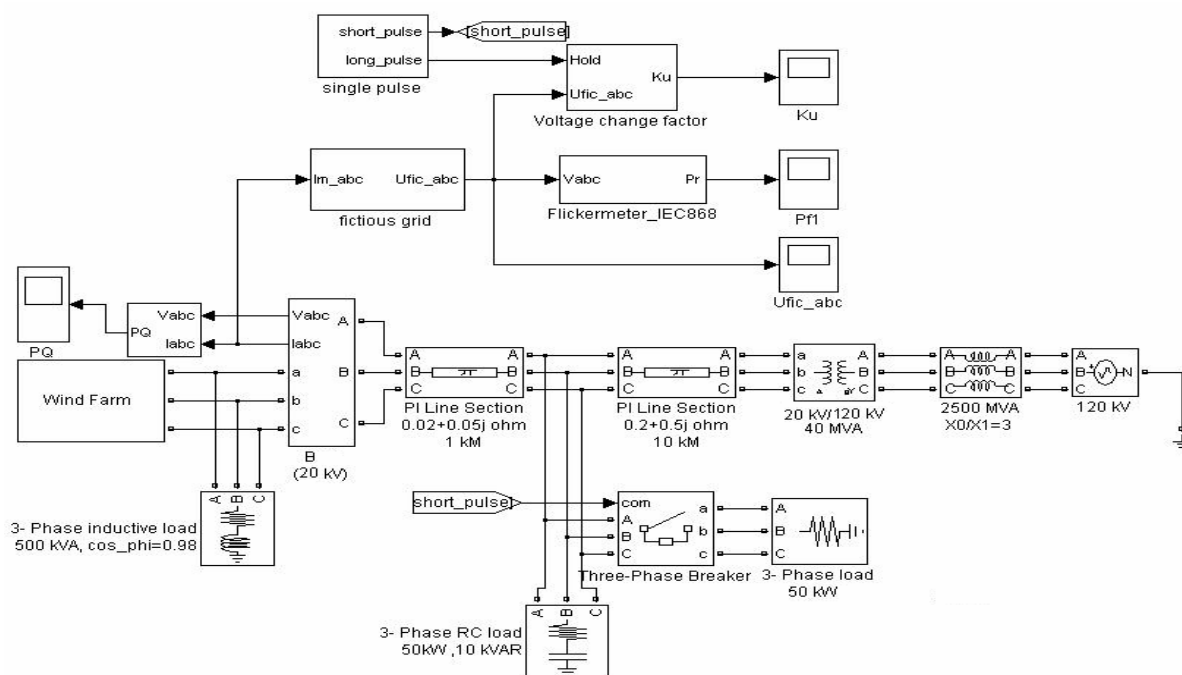
نتایج حاصل از این اندازه‌گیری، مانند ولتاژ شبکه فرضی بر حسب زمان $u_{fic}(t)$ ، برای فاز α در شکل (۱۴) نمایش داده شده است، شکل (۱۵) مقدار سطح فلیکر لحظه‌ای، $P_f(\psi_k)$ ، را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تابع چگالی احتمال تجمعی ثوابت فلیکر در ۱۸ ثانیه برای سیگنال شکل (۱۴) به عنوان ورودی در شکل (۱۶) آمده است.



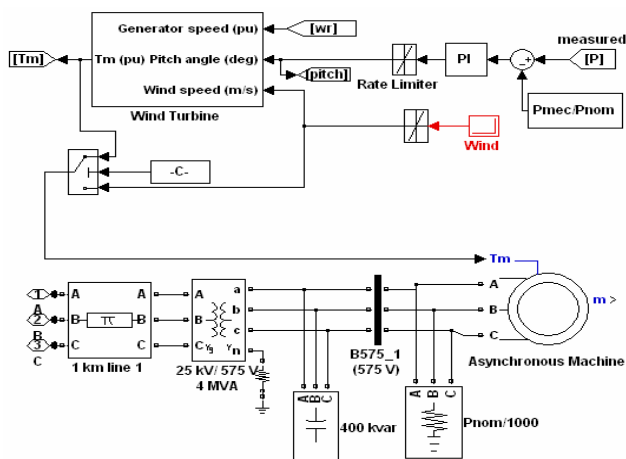
شکل ۱۲: پاسخ فلیکر سنج به سیگنال ورودی کالیبراسیون

۲-۴- آزمایش مدل فلیکرسنج در اندازه‌گیری فلیکر و

پارامترهای مربوط به آن با اتصال نیروگاه بادی به شکل برق: در این بخش فلیکر سنج و صحت عملکرد آن را، با یک شبکه برق

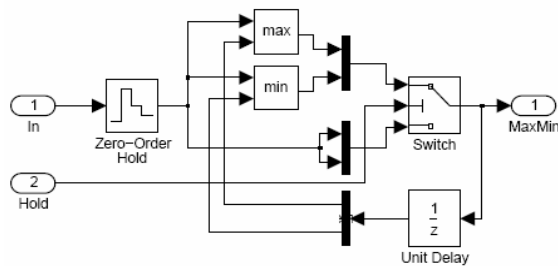


شکل ۱۳- الف: مدار آزمایشی برای فلیکرسنج

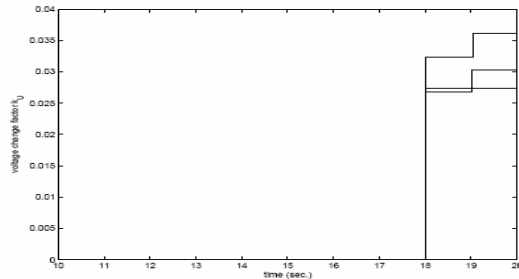


شکل ۱۳- ب: مدل مزرعه بادی (Wind Farm)

که با استفاده از بلوک‌های موجود در نرم افزار طراحی شده است مورد آزمایش قرار می‌گیرد، شبکه شامل یک واحد طراحی شده نیروگاه بادی با ژنراتور القایی قفسه‌ای و مدل باد و کنترل زاویه گام، زاویه پره‌های توربین می‌باشد. خروجی این واحد در دو مرحله افزایش ولتاژ به سطح ولتاژ شبکه توزیع و در نهایت شبکه انتقال می‌رسد و به باس بی‌نهایت وصل می‌شود، منبع فلیکر در این شبکه یک ولتاژ با مدولاسیون (AM) یا منبع ولتاژ قابل کنترل سه فاز است. دامنه سیگنال مدولاسیون ۰/۲۵ پریودیت و فرکانس ۸/۸ هرتز است، مدولاسیون در t برابر ۱۲ ثانیه آغاز شده و در t برابر ۱۵ ثانیه پایان می‌یابد. در نتیجه در t برابر ۱۸ ثانیه، یک تغییر پله‌ای ۵۰ کیلوواتی برای بار، با بستن کلید فشار قوی (ژنکتور) ایجاد می‌گردد، و در t برابر ۱۹ ثانیه کلید دوباره باز می‌شود.



شکل ۱۷: نحوه محاسبه مقادیر مینیمم و ماکزیمم ولتاژ



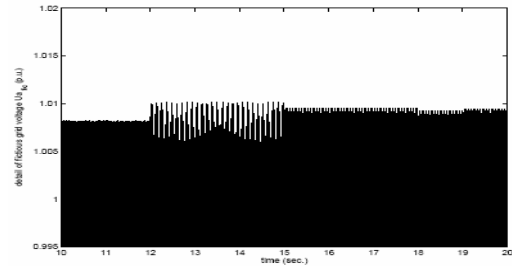
شکل ۱۸: محاسبه ضریب تغییرات ولتاژ

۵- نتایج :

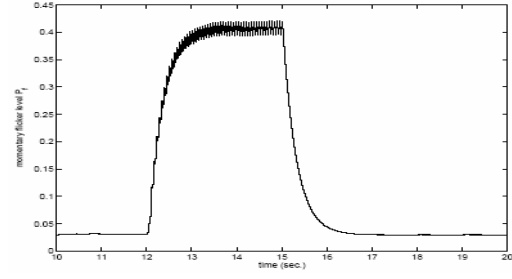
یک فلیکر سنج را با توجه به ساختار کلی این دستگاه در استانداردهای IEC-۶۰۸۶۸ و IEC-۶۱۰۰۰-۴-۱۵، کمیسیون جهانی الکتروتکنیک، در محیط نرم افزار مدل و شبیه سازی شد. و نتایج و صحت عملکرد دستگاه مدل شده نیز در دو آزمایش مختلف، برای سیگنال کالیبراسیون اعمالی به دستگاه، و دیگری برای پاسخ یک شبکه برق واقعی شبیه سازی شده، و متصل به نیروگاه بادی با یک منبع ولتاژ قابل کنترل، بررسی شد. نتایج و عملکرد دستگاه رضایتبخش و مطابق پیش بینی ها می باشد، این مدل می تواند در موارد دیگر شبکه نیز، هم با وجود مزرعه بادی و هم بدون آن، به کار رود، تا مقادیر متناظر فلیکر و پارامترهای مربوط به آن در یک شینه دلخواه، به دست آیند. البته مناسبتر بود که دستگاه واقعی این مدل در شبکه شامل مزارع بادی نصب شود و نتایج آن با نتایج دستگاه مدل شده برای همان شبکه مقایسه و در صورت وجود کاستی ها در مدل، جبران گردند.

۶- مراجع:

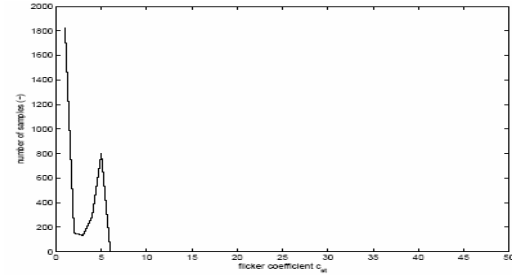
- [۱] بهمن خاکی، « بررسی کیفیت توان توربین و مزارع بادی در اتصال به شبکه برق»، کنفرانس بین المللی برق (PSC 2005).
- [2] International Electrotechnical Commission, "Flicker meter - Functional and Design Specifications", IEC Standard, Publication 60868, 1990.
- [3] Sorensen, P. "Methods for calculation of the Flicker Contribution form Wind Turbines", riso National Laboratory, Riso-I-939, December 1995.
- [4] International Electrotechnical Commission, IEC Standard, Publication 61000-4-15.
- [5] Gerdes, G. Santjer, F. "Power Quality of wind turbines and their Interaction with the Grid", Proceeding of European wind Energy conference (EWEC/94), p.1112-1115, 1994.



شکل ۱۴: ولتاژ خروجی شبکه فرضی



شکل ۱۵: پاسخ سطح فلیکر لحظه ای بر حسب زمان



شکل ۱۶: تابع چگالی احتمالی تجمسی برای ثابت فلیکر

۴-۳- محاسبه ضریب پله فلیکر و ضریب تغییرات ولتاژ

این ضریب ها نیز در بحث فلیکر مورد بررسی قرار می گیرند، ضریب پله فلیکر و ضریب تغییرات ولتاژ برای ولتاژ خروجی که در شکل (۱۴) نمایش داده شده است، بدست می آیند، ضریب پله فلیکر و ضریب تغییرات ولتاژ را با $K_f(\psi_k)$ و $K_v(\psi_k)$ نشان می دهیم.

$$K_f(\psi_k) = \frac{1}{36} \frac{S_{k, fic}}{S_n} \cdot P_{st}(\psi_k) \quad (6)$$

$$K_u(\psi_k) = \sqrt{3} \frac{S_{k, fic}}{S_n} \cdot \frac{u_{fic, max} - u_{fic, min}}{u_n} \quad (7)$$

برای یک تناوب ولتاژ موثر شبکه فرضی، حین عملیات کلیدزنی توربین بادی می باشند. برای محاسبه $u_{fic, min}$ و $u_{fic, max}$ روی تناوبی خاص، به مدل بلوکی دیگری که در شکل ۱۷ آمده است، نیاز داریم، همچنین در شکل ۱۸، پاسخ ضریب تغییرات ولتاژ $K_u(\psi_k)$ نشان داده شده است، بر طبق آن تغییرات پاسخ با کاهش بار در t برابر ۱۹ ثانیه، بیشترین حساسیت را نشان می دهد. به علاوه تغییرات ولتاژی برای هر یک از سه فاز به دلیل زمانهای کلیدزنی متفاوت، یکسان نیست.