

# ارزیابی فلیکر ایجاد شده از ژنراتور سنکرون درایو شده توسط توربین انبساطی در شبکه توزیع

مهدی بابائی ترکمانی<sup>۱</sup> حسن رستگار<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

[mehdiaraz@gmail.com](mailto:mehdiaraz@gmail.com)

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران

[rastegar@aut.ac.ir](mailto:rastegar@aut.ac.ir)

**چکیده:** شبکه‌های گسترده‌ی خطوط انتقال گاز طبیعی و لزوم تقلیل فشار از سطح انتقال به سطح توزیع در مبادی ورودی شهرها، منجر به استفاده از فشارشکن‌های مکانیکی شده است. این کار، انرژی نهفته در گاز فشار بالا را هدر می‌دهد. با توجه به اهمیت روزافزون استفاده بهینه از انرژی هدررو در فرایندهای مختلف، لزوم بازیابی این منبع انرژی عظیم احساس می‌شود. توربین‌های انبساطی، انبساط‌گرهای چرخانی هستند که ضمن کاهش فشار گاز طبیعی، می‌توانند این انرژی را بازیافت نموده و برای تولید برق به ژنراتور الکتریکی یا مصارف دیگر از قبیل بارهای کمپرسوری تحویل دهند. از طرفی بدلیل تغییرات لحظه‌ای و تصادفی فشار و دبی گاز ورودی به توربین انبساطی، توان تولیدی آن متغیر می‌باشد که در نتیجه در شبکه‌های ضعیف ایجاد فلیکر ولتاژ خواهد کرد. در این مقاله ضمن مدلسازی توربین انبساطی برای مطالعات فلیکر، میزان فلیکر ایجاد شده در شینه‌ی اتصال ژنراتور به شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین اثرات تغییر مشخصات گاز ورودی به توربین انبساطی و پارامترهای شبکه توزیع بر میزان فلیکر ایجاد شده در نقطه کولپینگ مشترک (PCC) مورد بررسی واقع می‌شود.

**کلمات کلیدی:** بازیافت انرژی، توربین انبساطی، ژنراتور سنکرون، فلیکر ولتاژ، گاز طبیعی، مدلسازی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۷/۹/۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۸۹/۳/۸

نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی بابائی ترکمانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - خیابان شادمهر - جنب شیرینی سرای گلچین - پلاک ۲۸۸ - طبقه دوم، منزل سلطان محمدی

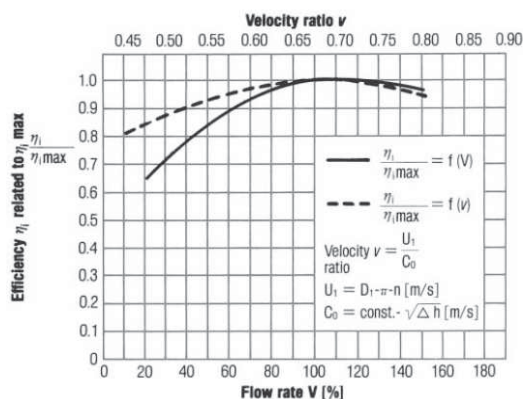
## ۲- توربین‌های انبساطی و کاربردها

به هر دستگاهی که بتواند از یک جریان مداوم سیال انرژی بگیرد و یا به آن انرژی بدهد، توربوماشین می‌گویند. توربین، توربوماشینی است که با انبساط مداوم یک سیال جاری، به فشار کمتر یا آنتالپی کمتر، قدرت تولید می‌کند، قدرت خروجی معمولاً بر حسب kW (کیلو وات) است [۷]. توربین انبساطی نوع توربین خاصی است که باید با ویژگی‌هایی طراحی شود که الزامات زیر را برآورده سازد [۸]:

- کار در بازدهی بالا با تغییرات جریان
- تحمل کردن گرد و غبار و چگالش بخار گازی
- استحکام یا تاقان برای جلوگیری از آسیب دیدن روتور که توسط ته نشین شدن یخ یا فرسودگی نامتعادل می‌شود.
- بازدهی بالا (که معمولاً سرعت بالا را می‌طلبد)
- قابلیت اطمینان بهبود یافته
- درزبندی محکم شفت و سایر درزبندی‌های حساس
- کنترل جریان متغیر.

توربین‌های انبساطی با کیفیت بالا، افشانه‌های کنترل جریان متغیر دارند که قادر است در مقابل فشار کلی مقاومت نموده و مثل یک کنترل کننده جریان برای بخار گاز اصلی در طول فرآیند عمل نمایند. افشانه متغیر باید با روتور سازگار باشد تا بتواند بازدهی بالائی در محدوده تغییر جریان ارائه دهد. شکل (۱) این محدوده را مشخص می‌کند و معمولاً از ۵۰٪ تا ۱۲۰٪ طراحی یا بیشتر را شامل می‌شود [۸].

کلاً در هر فرایندی که سیال با دبی حجمی پایین، فشار و دمای بالا در اختیار باشد و بتوان آن را در یک سیکل یا پروسه‌ای منبسط نمود، می‌توان از توربین‌های انبساطی برای بازیافت انرژی استفاده کرد. در حقیقت، پتانسیل استفاده از این نوع کاربردها در منابعی چون، انرژی-های اقیانوس گرمائی، گرمای خورشیدی، زمین گرمائی، گرمای اتلافی، گاز طبیعی و کاهش فشار گاز اتلافی و ... می‌باشد.



شکل (۱): منحنی مشخصه بازده یک توربین انبساطی نوعی بر حسب دبی نشان داده شده است. همچنین بازده بر حسب نسبت سرعت (نسبت سرعت نوک به سرعت دهانه) نیز نشان داده شده است [۸]

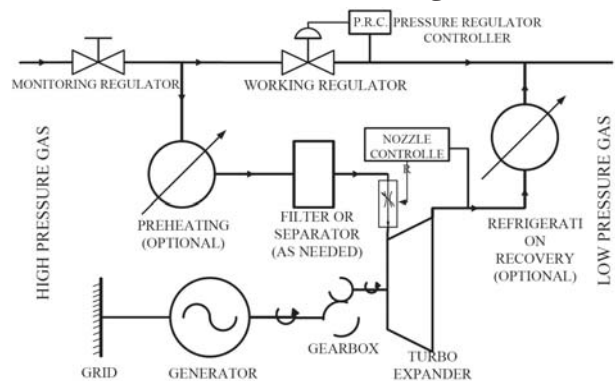
در صنعت گاز طبیعی، به منظور کاهش اندازه لوله‌ها و در نتیجه میزان تلفات انتقال، گاز را در سطوح فشار بالا انتقال می‌دهند. فشار نوعی در سطوح انتقال ۲۰۰ تا ۱۵۰۰ psi است. بنابراین برای استفاده های صنعتی و مسکونی لازم است فشار گاز از سطوح انتقال به سطوح توزیع کاهش داده شود. معمولاً، این کار در ایستگاه های کاهش فشار و توسط شیرهای فشارشکن مکانیکی انجام می‌شود که در این صورت انرژی نهفته در گاز فشار بالا از بین می‌رود [۱]. توربین های انبساطی می‌توانند به صورت موازی با این ایستگاه‌های کاهش فشار گاز نصب و ضمن کاهش فشار گاز، انرژی نهفته در آن را بازیافت و به ژنراتورهای الکتریکی، کمپرسورها و سایر بارها تحویل دهند. به طور خلاصه، اگر یک خط انتقال گاز و یک شبکه توزیع داشته باشیم، در آن صورت می‌توان با نصب توربین انبساطی مقدار زیادی انرژی استحصال و به الکتریسیته تبدیل نمود [۲]. در اواسط دهه ۱۹۷۰، یک توربین انبساطی کوچک در ایستگاه کاهش فشار گازی در انگلستان نصب و انرژی استحصالی جهت تولید برق استفاده شد. با این حال، در آن زمان بازار مناسبی برای برق تولیدی وجود نداشت. چون اولاً هزینه نصب و قیمت برق تولیدی بالا بود و ثانیاً اهمیت کمی به انرژی های نو داده می‌شد [۳]. مرجع [۴]، طراحی و نصب یک توربین انبساطی ۲۵۰ kW را به منظور بازیافت انرژی در یک ایستگاه کاهش فشار گاز در ایالت آلبرتا، کلگری شرح می‌دهد. در سالهای اخیر، مصرف گاز فزونی یافته و مدت زمان بازگشت سرمایه برای یک نصب نوعی به ۱۸ الی ۲۴ ماه رسیده است که این موضوع اقتصادی بودن طرح را توجیه می‌نماید [۵].

گفتار فوق اهمیت نصب توربین‌های انبساطی و لزوم تولید برق از انرژی عظیم نهفته در گاز فشار بالا را نشان می‌دهد. تاکنون هیچ مطالعه‌ای در مورد میزان و کیفیت برق تولیدی از توربین‌های انبساطی و اثرات آن بر روی شبکه توزیع برق انجام نشده است. در حالی که میزان مصرف گاز دائماً در حال تغییر است، در نتیجه میزان دبی ورودی به آن نیز متغیر خواهد بود. علاوه بر آن بدلائل شرایط جوی و محیطی باز فشار و دبی ورودی به توربین انبساطی تغییر می‌کند و این موارد باعث نوسانی بودن توان تولیدی از توربین و ژنراتور متصل به آن می‌شود و در نهایت شاهد فلیکر ولتاژ در نقطه اتصال مشترک به شبکه توزیع خواهیم بود [۶ و ۱۹]. در این مقاله ابتدا در مورد توربین‌های انبساطی، کاربردها و چگونگی نصب آنها در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی بحث شده، سپس مدل مناسبی از توربین انبساطی متصل به ژنراتور سنکرون جهت مطالعات فلیکر ارائه می‌شود. در نهایت با در نظر گرفتن نوسانی بودن توان تولیدی توربین (به علت تغییر فشار و دبی گاز ورودی به توربین) و انتقال این نوسانات از طریق ژنراتور به شبکه توزیع، فلیکر ایجاد شده در نقطه اتصال مشترک PCC مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

### ۳- مدلسازی توربین انبساطی جهت مطالعات فلیکر

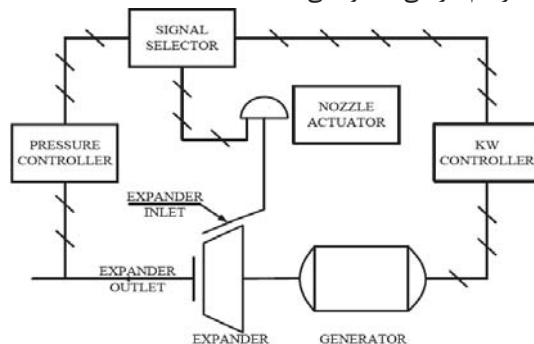
#### ۳-۱- سیستم مورد مطالعه و شرایط مدلسازی

با توجه به شکل (۲) که نصب یک توربین انبساطی را به موازات یک خط انتقال گاز در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری نشان می‌دهد، مدلسازی انجام می‌شود (خط لوله موازی، فقط برای بای پس اضافه دبی توربین انبساطی است و هیچ خللی در کار مدلسازی وارد نمی‌کند). نقطه تنظیم سیستم کنترلی انبساط‌گر به میزان کمی بالاتر از نقطه تنظیم رگولاتورها قرار داده شده است. بنابراین، گاز ابتدا در انبساط‌گر جریان داشته و سپس رگولاتورها به محض تجاوز دبی از ظرفیت انبساط‌گر آنرا عبور می‌دهند.



شکل (۲): مدلسازی توربین با توجه به شرایط فوق انجام می‌شود [۸]

اگر با توجه به محاسبات ترمودینامیکی، (با در نظر گرفتن نسبت فشار، فشار ورودی، دما ورودی و ترکیب گاز ورودی) امکان تشکیل هیدرات در پایین دست توربین (طرف فشار پایین) وجود داشته باشد، پیش گرمایش انجام می‌شود. فلیتر ورودی ناخالصی‌ها را جذب نموده و مانع از فرسایش و خوردگی توربین و احیاناً آخلال در عملکرد آن می‌شود. سیستم کنترلی شکل (۳)، فشار را در پایین دست توربین ثابت نگه می‌دارد. سیستم کنترلی، پنیوماتیک و شامل دو حالت کنترلی اصلی می‌باشد. حالت اول فشار را در سیستم لوله‌کشی پایین دست انبساط‌گر کنترل می‌کند. حالت کنترلی دوم، خروجی ژنراتور را کنترل و در ماکزیمم طراحی محدود می‌کند.



شکل (۳): سیستم کنترل افزایش دبی توربین انبساطی [۸]

برای مطالعات الکتریکی، تغییرات سریع فشار و دبی در محدوده خاصی مدنظر است که سیستم کنترل پنیوماتیکی قادر به حذف این تغییرات نیست.

#### ۳-۲- مدل محاسبه توان و در نظرگیری اثر راندمان

بعد از اینکه سیال با فشار، دبی و دمای معینی وارد توربین می‌شود، با نسبت فشار مشخصی منبسط می‌شود، در این فرایند که می‌توان آن را ایزوتروپیک فرض نمود [۹]، دمای سیال نیز کاهش می‌یابد و در حقیقت آنتالپی سیال کم می‌شود، با توجه به قانون اول ترمودینامیک مطابق رابطه (۱) توان اعمالی به محور برابر است با:

$$P_{fluid} = \dot{m} \times (h_{in,e} - h_{out,e}) \quad (1)$$

که در آن  $\dot{m}$ ، دبی ورودی بر حسب  $Kg/sec$  و  $h_{in,e}$  و  $h_{out,e}$  آنتالپی ویژه ورودی و خروجی انبساط‌گر بر حسب  $KJ/Kg$  و

$P_{fluid}$  توان گرفته شده از سیال بر حسب  $kW$  است.

با توجه به این نکته که پارامترهای ورودی سیستم، فشار (p)، دبی ( $\dot{m}$ ) و دمای ورودی (T)، و معلومات مسئله نسبت فشار و فرض ایزوتروپیک بودن فرایند است، پس لازم است برای محاسبه توان، آنتالپی ورودی و خروجی، از این پارامترها و مفروضات بدست آید [۱۰]. اگر سیال منبسط شده در توربین را گاز طبیعی در نظر بگیریم، با علم به اینکه حدود ۸۵٪ تا ۹۵٪ آن را متان تشکیل می‌دهد، می‌توان برای

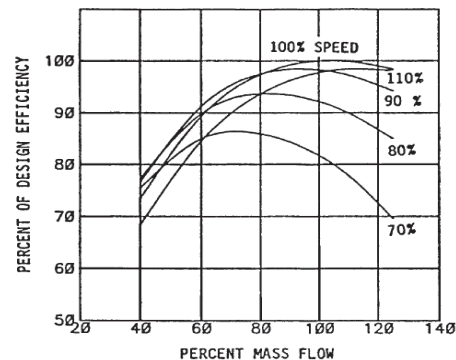
دما و فشار ورودی، آنتالپی ورودی ( $h_{in,e}$ ) را از جداول ترمودینامیکی بدست آورد. با توجه به ایزوتروپیک بودن فرایند، انتروپی خروجی (پایین دست توربین) با انتروپی ورودی برابر است و برای انتروپی و فشار خروجی معلوم، آنتالپی خروجی ( $h_{out,e}$ ) نیز بدست می‌آید. برای محاسبه این مقادیر ترمودینامیکی از نرم افزار EES(32bit) استفاده شد، با اطلاعات این نرم افزار برای محدوده فشاری معین، lookup table هائی برای محاسبه آنتالپی ورودی و خروجی تشکیل گردید. همچنین محاسبات نشان داد که برای دمای گاز ورودی ۹۵ درجه سانتیگراد و محدوده فشار ورودی ۴۰ تا ۵۰ Bar و فشار خروجی ثابت ۱۸.۳ Bar، دمای کمینه‌ی گاز در پایین دست توربین انبساطی به ۱۳ درجه می‌رسد. البته این دما با در نظر گرفتن محاسبات ترمودینامیکی متان بدست آمده در حالی که با در نظر گرفتن سایر مخلوط‌های گاز طبیعی، مانند نیتروژن و اتان، دما خروجی کمینه بیشتر از مقدار فوق خواهد شد و امکان تشکیل هیدرات در پایین دست توربین کاملاً منتفی است [۱۱].

توانی که از رابطه‌ی (۱) بدست آمد بدون در نظر گرفتن تاثیرات تغییر دبی و فشار ورودی بر راندمان توربین انبساطی است، در حالی که شکل (۴) نشان می‌دهد که با انحراف این کمیت‌ها از مقدار نامی توربین

انبساطی، راندمان نیز از مقدار طراحی کمتر خواهد شد. برای در نظر گرفتن این تغییرات از رابطه‌های (۲) و (۳) برای محاسبه راندمان استفاده می‌شود [۹]. در این روابط،  $P_{rated}$ ؛ فشار نامی،  $P_{inlet}$ ؛ فشار ورودی،  $\dot{m}_{rated}$ ؛ دبی نامی،  $\dot{m}_{inlet}$ ؛ دبی ورودی و O.C. مخفف شرایط نقطه کار (Operation Condition) و  $\eta_{lb}$ ؛ راندمان کمینهی توربین،  $\eta_{ub}$ ؛ راندمان بیشینهی آن و در نهایت  $\eta_{total}$ ؛ راندمان کل توربین با توجه به شرایط نقطه کار است.

$$O.C. = \left(1 - \frac{P_{rated} - P_{inlet}}{P_{rated}}\right) \times \left(1 - \frac{\dot{m}_{rated} - \dot{m}_{inlet}}{\dot{m}_{rated}}\right) \quad (2)$$

$$\eta_{total} = O.C. \times (\eta_{lub} - \eta_{lb}) + \eta_{lb} \quad (3)$$



شکل (۴): راندمان توربین انبساطی بر اساس تغییر دبی و برای سرعت‌های مختلف [۸]

برای توربین شبیه‌سازی شده در این مقاله راندمان کمینه 71% و راندمان بیشینه 82.5% در نظر گرفته شده است.

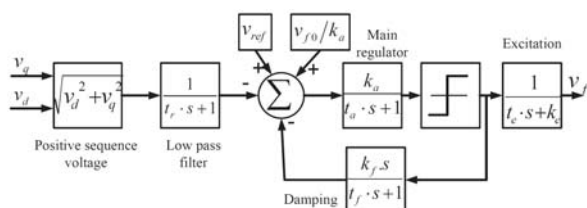
#### ۴- مطالعات فلیکر

در سالهای اولیه اختراع برق و استفاده از این انرژی برای روشنایی، مردم کم و بیش با پدیده‌ی سوسو زدن نور در لامپها برخورد کردند ولی به علت نو بودن انرژی الکتریکی توجه چندانی به آن نداشتند. با پیشرفت تکنولوژی و تولید دستگاهها و تجهیزات مختلف برقی حساس به کیفیت برق (مثل کامپیوترها، تلویزیون، سیستمهای ICU و CCU

پزشکی و ...) این مسئله باعث نارضایتی مشترکین گردید. این پدیده که در آن سیگنال قدرت (۵۰ یا ۶۰ Hz) با سیگنال ۰.۵ تا ۲۵ Hz مدوله می‌شود و با چشم انسان قابل درک است، فلیکر یا نوسان ولتاژ نامیده می‌شود. از عوامل ایجاد نوسان ولتاژ در شبکه قدرت می‌توان به تغییرات ناگهانی در جریان تجهیزاتی چون کوره‌های الکتریکی، دستگاه‌های نورد، حفاری، جوشکاری و جریان راه‌اندازی موتورهای اشاره کرد. کلاً ترکیب جریان بالای کشیده شده توسط تجهیز و ضریب قدرت پایین باعث ایجاد فلیکر می‌شود [۱۲]. انتظار می‌رود بدلیل ماهیت نوسانی بودن توان تولیدی توربین انبساطی (بدلیل تغییرات مستمر فشار و دبی)، و گسترش روزافزون استفاده از آنها در آینده‌ای نزدیک، مسئله فلیکر ولتاژ تولیدی توسط ژنراتورهای درایو شده توسط این نوع توربین‌ها جدی باشد. از عوامل مهم و تعیین‌کننده در شدت نوسان ولتاژ، حساسیت چشم انسان نسبت به دامنه و فرکانس تغییرات نور می‌باشد. روش اندازه‌گیری فلیکر را می‌توان بر مبنای احساس انسان از نوسانات نور لامپ بنا نمود. در واقع فلیکر متر، دستگاهی است که معیاری از شدت فلیکر ایجاد شده توسط نوسانات ولتاژ اعمال شده به یک لامپ را ارائه می‌نماید [۱۳]. شاخص شدت فلیکر کوتاه مدت  $P_{st}$  برای یک دوره‌ی ۱۰ دقیقه‌ای تعریف می‌شود.  $P_{st}=1$  آستانه آزادهی چشم انسان است و مقادیر کمتر از ۱ نیز میزان فلیکر قابل درک با چشم می‌باشد. شاخص شدت فلیکر بلند مدت  $P_{lt}$  برای یک دوره ۲ ساعته و بر اساس مقادیر متوالی  $P_{st}$  محاسبه می‌شود [۱۲]. نکته‌ی مهمی که باید در مطالعات کیفیت توان در نظر گرفته شود اینست که این مطالعات در حالت دائمی انجام می‌شود [۱۴]، بنابراین لازم است در شبکه پخش بار انجام شود و شرایط اولیه‌ی ماشین‌ها مشخص گردد. همچنین باید توجه کرد که برای مطالعات فلیکر فقط مشخصه‌ی توان استحصالی از توربین انبساطی مدنظر است که در قسمت ۳ بطور تشریحی بدست آمد و نیازی به مدلسازی رفتار حالت گذرا و قسمت‌هایی همچون جعبه‌دنده نیست [۱۵]. برای محاسبه شاخص شدت فلیکر کوتاه مدت که شاخصی از میزان فلیکر موجود در سیگنال مورد بررسی است، از فلیکر متر استاندارد IEC استفاده می‌شود. این دستگاه بر اساس الزامات استاندارد IEC 61000-4-15 برای محیط نرم‌افزار MATLAB ساخته شد. بر اساس استاندارد برای سیگنال‌های جدول (۱) شاخص فلیکر کوتاه مدت  $P_{st}$  محاسبه شده توسط فلیکر متر، باید در محدوده‌ی  $0.05 \pm 1$  باشد [۱۶].

جدول (۱): تست فلیکرمتر ساخته شده در MATLAB

تعداد تغییرات در دقیقه	۱	۲	۷	۳۹	۱۱۰	۱۶۲۰
تغییر ولتاژ به درصد	۲.۷۲	۲.۲۱	۱.۴۶	۰.۹۰۵	۰.۷۲۵	۰.۴۰۲
شاخص فلیکر کوتاه مدت	۰.۹۶	۰.۹۸۱	۱.۰۰۲	۱.۰۱۱۶	۰.۹۹۷۴	۰.۹۷۹۳



شکل (۶): سیستم تحریک ژنراتور سنکرون.

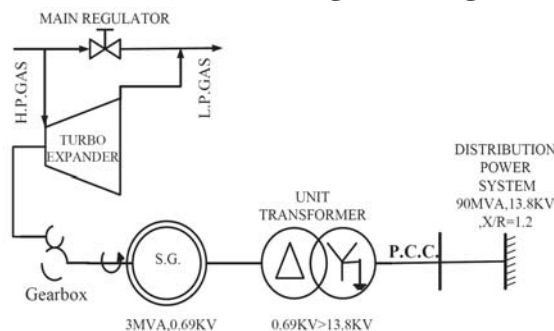
جدول (۳): مقادیر پارامترهای سیستم تحریک

(ka و ta)، بهره و ثابت زمانی تنظیم کننده، tr، ثابت زمانی فیلتر پایین گذر، kf و tf، بهره و ثابت زمانی سیستم فیدبک مرتبه اول، ke و te، بهره و ثابت زمانی تحریک و vref و vf0 ولتاژ ترمینال مطلوب و ولتاژ تحریک اولیه می‌باشند. دو پارامتر اخیر با انجام پخش بار تعیین می‌شوند.

Excitation system parameters values	
ka=200	ta=0.02 Sec.
tr=0.02 Sec.	kf=0.001
tf=0.1 Sec.	te=0 and ke=1

حال باید دید اگر توان اعمالی به ژنراتور سنکرون، توان استحصالی ناشی از تقلیل فشار خط لوله‌ای گاز طبیعی، توسط یک توربین انبساطی در یک ایستگاه شهری باشد فلیکر نقطه PCC چه میزان خواهد بود و با تغییر پارامترهای شبکه و مشخصات گاز ورودی به توربین چگونه تغییر خواهد کرد. شکل (۷)، دبی و فشار ورودی به توربین انبساطی را نشان می‌دهد. برای دبی ورودی انحراف ۱۰٪ و برای فشار ورودی انحراف ۵٪ نسبت به مقدار میانگینشان در نظر گرفته شده است.

شکل (۵)، سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد که در آن یک ژنراتور سنکرون درایو شده با توربین انبساطی، از طریق یک ترانسفورماتور ۳MVA به یک شبکه توزیع که با سطح اتصال کوتاه و نسبت X/R مدل شده، متصل می‌شود. مشخصات ژنراتور سنکرون در جدول (۲) آمده است. برای ژنراتور سنکرون، مدل مرتبه شش فضای حالت برای قسمت الکتریکی در نظر گرفته شده است. قسمت مکانیکی آن نیز با یک ثابت اینرسی و ضریب میرایی مدل شده است [۱۷]



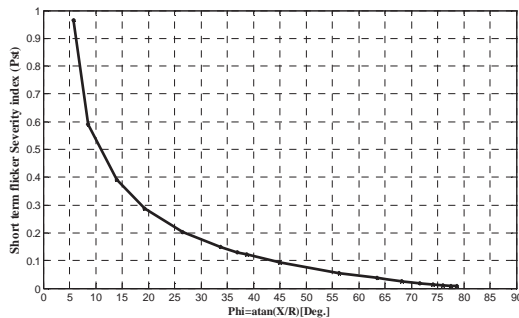
شکل (۵): شماتیک سیستم قدرت برای مطالعات فلیکر

جدول (۲): پارامترهای ماشین سنکرون [۱۷]

(سیستم تحریک ژنراتور، یک تنظیم کننده ولتاژ ماشین سنکرون مدل IEEE Type1 است [۱۸]. شکل (۶)، بلوک دیاگرام سیستم تحریک استفاده شده و جدول (۳)، مقادیر پارامترهای آن را نشان می‌دهد)

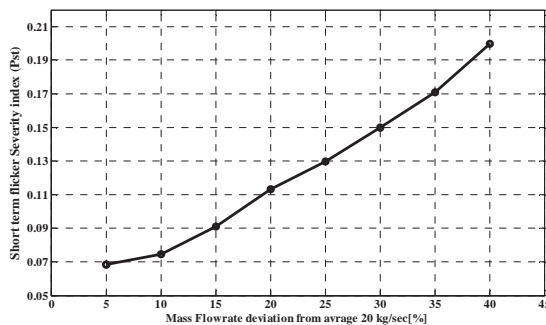
Synchronous Machine Parameters	
Apparent power=3MVA	$= 1.01 \text{ (sec.) } T_d'$
Terminal voltage =0.69KV	$= 0.053 \text{ (sec.) } T_d''$
$= 1.305 \text{ (p.u.) } X_d$	$= 0.01 \text{ (sec.) } T_{qo}'$
$= 0.296 \text{ (p.u.) } X_d'$	$R_s = 0.00285 \text{ (p.u.)}$
$= 0.252 \text{ (p.u.) } X_d''$	H = 2 sec.
$= 0.474 \text{ (p.u.) } X_q$	Friction factor = 0.02 p.u.
$= 0.243 \text{ (p.u.) } X_q'$	Pole pairs = 32
$= 0.180 \text{ (p.u.) } X_l$	Initial condition = 0.

حال فرض می‌کنیم که سطح اتصال کوتاه شبکه ثابت و برابر ۹۰MVA باشد، در عوض زاویه امیدانس اتصال کوتاه  $\Phi$  یا همان نسبت  $X/R$  تغییر کند. برای تغییرات فشار ورودی توربین انبساطی ۵٪ و تغییرات دبی ۱۰٪، مقدار فلیکر کوتاه مدت ولتاژ PCC بر حسب زاویه امیدانس اتصال کوتاه شبکه  $\Phi$  به صورت شکل (۱۰) تغییر خواهد کرد.



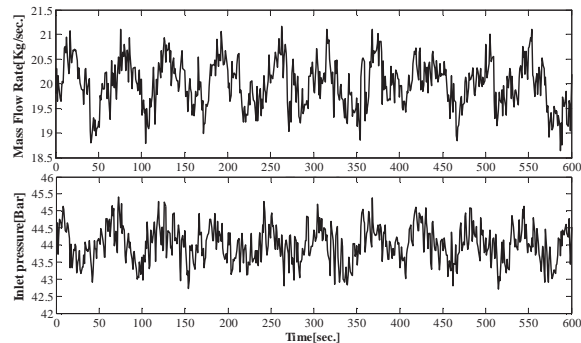
شکل (۱۰): شاخص فلیکر کوتاه مدت در PCC به ازای  $\Phi$ های مختلف

در ادامه به تغییر مشخصات گاز ورودی توربین انبساطی می‌پردازیم، و تغییرات دبی را از ۵٪ تا ۴۰٪ در نظر می‌گیریم، شکل (۱۱)، اثر این تغییرات را در فلیکر ولتاژ PCC در شبکه ۹۰MVA،  $X/R=1.2$  نشان می‌دهد.



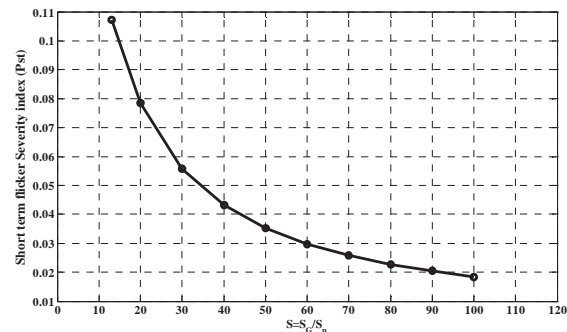
شکل (۱۱): شدت فلیکر نقطه PCC بر حسب میزان تغییرات دبی (درصد انحراف دبی از مقدار میانگین)، تغییرات فشار ۵٪ است

با ثابت نگه داشتن مقدار انحراف دبی و فشار در مقادیر ۱۰٪ و ۵٪، این بار مقدار متوسط دبی ورودی به توربین انبساطی را متغیر در نظر می‌گیریم، بدین ترتیب مقدار شدت فلیکر کوتاه مدت به صورت شکل (۱۲) تغییر خواهد کرد (سطح اتصال کوتاه شبکه ۹۰MVA و  $X/R=1.2$ ).



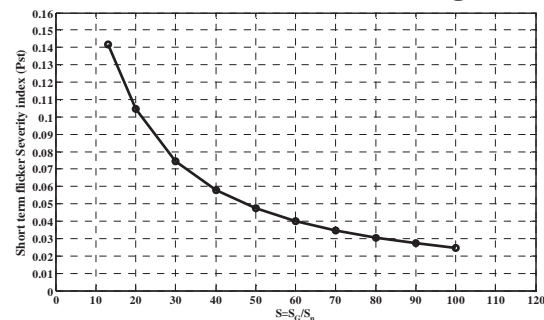
شکل (۷): دبی و فشار ورودی به توربین انبساطی

ابتدا فشار ورودی توربین انبساطی را ثابت و برابر ۴۴Bar در نظر می‌گیریم ولی دبی دارای تغییرات تصادفی ۱۰٪ درصدی است. با شرایط شبکه فوق و تغییرات دبی گاز ورودی به توربین انبساطی، فلیکر موجود در نقطه PCC بر حسب  $S=SG/S_n$  به صورت شکل (۸) خواهد بود.  $S_n$  قدرت ظاهری ماشین و  $SG$  سطح اتصال کوتاه شبکه است.



شکل (۸): فلیکر در نقطه PCC با زیاد شدن نسبت سطح اتصال کوتاه شبکه به توان نامی ژنراتور کاهش می‌یابد (برای تغییرات دبی ۱۰٪ و تغییرات فشار ورودی ثابت)

در ادامه مطالعه، علاوه بر تغییرات ۱۰٪ دبی، برای فشار ورودی نیز تغییراتی در نظر می‌گیریم. مقدار این تغییرات ۵٪ فشار متوسط (۴۴Bar) می‌باشد. با در نظر گرفتن تغییرات دبی و فشار ورودی میزان فلیکر ولتاژ PCC بر حسب  $S=SG/S_n$  به صورت شکل (۹) در می‌آید.

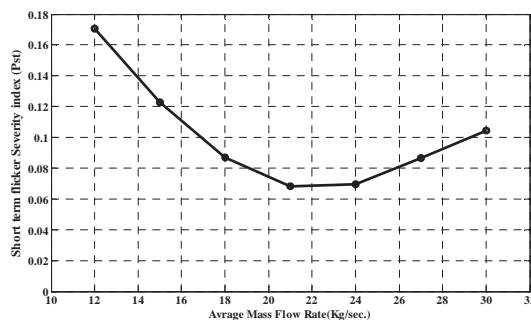


شکل (۹): شدت فلیکر کوتاه مدت در نقطه PCC بر حسب نسبت سطح اتصال کوتاه شبکه به توان نامی ژنراتور (با تغییرات دبی ۱۰٪ و تغییرات فشار ورودی ۵٪)

IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, Issue, pp. 616 – 621, 2002.

- [7] A. T. Sayers, Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines, New York, USA, McGraw Hill, 1990.
- [8] Heinz P. Bloch and Claire Soares, Turbo-expanders and process applications, New York: Gulf Professional Publishing, 2001.
- [9] Jesse D. Maddaloni and Andrew M. Rowe, "Natural gas energy recovery powering distributed hydrogen production", Elsevier, international journal of hydrogen energy, Volume 32, Issue 5, pp. 557-566, 2007.
- [10] Joseph M. Smith, H. C. Van Ness, Michael M. Abbott, Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, New York, USA, McGraw-Hill, 1996.
- [11] S.A. Klein and F.L. Alvarado, Engineering equation solver © 1992-1999 version 5.020 (32 Bit), 07/31/99.
- [12] R.C. Dugan and M. Mc Grangham, Electrical power systems quality, New York: McGraw-Hill, 2nd edition, 1996.
- [13] IEC 61000-4-5: Electromagnetic Compatibility (EMC) Part4: Testing and measurement techniques Section 15: Flicker meter – Flicker meter – functional and design specifications.
- [14] R.C. Dugan, M.McGrangham, Electrical power systems quality, New York, McGraw-Hill, 1996.
- [15] Tao Sun, Zhe Chen, Frede Blaabjerg, "Flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generators", IEEE Trans. On energy conversion, V. 20, No. 4, Dec. 2005.
- [16] A. Bertola, G.C. Lazariou, M. Roscia and D. Zaninelli, "A Matlab-Simulink Flicker-meter model for power quality studies", IEEE 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Volume, Issue, pp. 734 – 738, 2004.
- [17] P.C. Krouse, O. Waszynsek and S.D. Sudhoff, Analysis of electric machinery, New York: IEEE press, 2002.
- [18] IEEE standard 421-5-1992, Recommended practice for excitation system models for power system stability studies, Aug. 1992.

[۱۹] داریوش نظریور، سید حسین حسینی، مرتضی تیموری، "ارایش جدیدی از صافی فعال جهت اصلاح ضریب توان، جبران سازی هارمونیکها و کنترل توان راکتیو و متعادل سازی بار در سیستمهای سه فاز چهار سیمه"، مجله انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران، سال اول، شماره سوم، زمستان ۱۳۸۳



شکل (۱۲). شدت فلیکر کوتاه مدت در PCC بر حسب مقدار متوسط دبی ورودی (مقدار انحراف دبی و فشار ۱۰٪ و ۵٪)

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله اهمیت موضوع بازیافت انرژی از لوله های گاز فشار بالا در ایستگاه های کاهش فشار شهری و نیروگاهی، توسط توربین های انبساطی و گستردگی و تنوع کاربرد توربین های انبساطی مورد بحث و بررسی واقع شد. همچنین مدل مناسبی برای محاسبه توان استحصالی از توربین انبساطی در یک ایستگاه کاهش فشار گاز شهری و تاثیر شرایط نقطه کار بر راندمان توربین انبساطی ارائه شد. در نهایت با استفاده از فلیکرمتری که در محیط MATLAB توسعه یافته بود، اثرات ناشی از نوسانات توان ژنراتور سنکرون درایو شده توسط توربین انبساطی، از لحاظ فلیکر ولتاژ در نقطه اتصال مشترک ژنراتور با یک شبکه توزیع مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و میزان وابستگی فلیکر ولتاژ PCC، به تغییر پارامترهای گاز ورودی به توربین انبساطی و مشخصات سیستم قدرت مورد مطالعه، نشان داده شد. نتیجه اینکه اگر در شبکه های با سطح اتصال کوتاه پایین، یا شبکه های ضعیف از این نوع توربینها استفاده شود، لازم است تا برای حذف فلیکر ایجاد شده و بهبود کیفیت توان تولیدی اقداماتی صورت گیرد.

## تقدیر و تشکر

این تحقیق با مساعدت و همکاری کارکنان شرکت ملی گاز ایران انجام شده است. بدین وسیله از کارکنان آن شرکت تقدیر به عمل می آید.

## مراجع

- [1] Jaroslav Poživil, "Use of Expansion Turbines in Natural Gas Pressure Reduction Stations", Acta Montanistica Slovakia, Vol. 9, pp. 258-260, 2004.
- [2] Moruzzi, L. and Righi E, "Recover energy in natural gas by turbo-expansion", Pipe Line Industrial. Vol. 71, pp. 28-31, 1989.
- [3] Cleveland, A., "Power generation with turbo-expander", ASME, 90-DT-2, 1990.
- [4] Cleveland, A., "Turbo-expander for energy recovery: Design and Installation of a 250 kW unit", ASME 88-GT-266, 1988.
- [5] ETGseries Turbo-expandersBulletins, <http://www.AtlasCopco.com>.
- [6] Sun J., Czarkowski D. and Zabar Z., "Voltage flicker mitigation using PWM-based distribution STATCOM",