

بررسی نقش UPFC در بهبود عملکرد تأسیسات صنعتی شامل بارهای موتور

علی اصغر قدیمی مهرداد عابدی حسن رستگار گنورگ قره‌پتیان

دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی برق
(قطب علمی قدرت)
تهران - ایران

چکیده

در این مقاله کاربرد یک UPFC جهت بهبود پروفیل ولتاژ در یک شین صنعتی شامل بارهای موتور آنسکرون و بارهای استاتیک مورد توجه قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی بر روی یک سیستم قدرت نمونه نشان می‌دهد که UPFC قادر است به نحو مطلوبی پروفیل ولتاژ یکنواختی تولید نموده و در شرایط راه‌اندازی، بازگویی و بروز خطا در سیستم قدرت از ناپایداری موتورها جلوگیری نماید.

واژه‌های کلیدی: عناصر UPFC FACTS، کنترل ولتاژ، شبکه‌های صنعتی

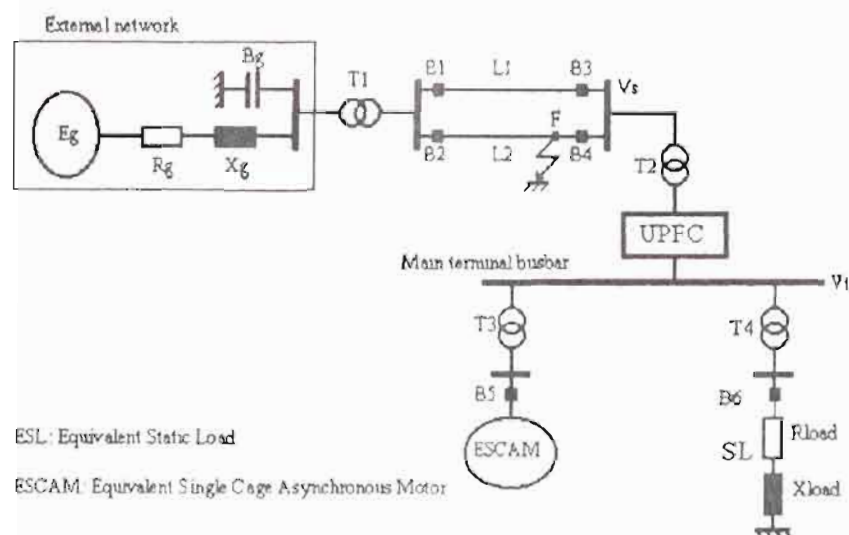
۱- مقدمه

در شبکه‌های صنعتی متداول بارهای موتوری نقش اساسی را بازی می‌کنند و این بارها به ولتاژ بسیار حساس می‌باشند. بعنوان مثال موتورهای سنکرون و یا موتورهای آنسکرون بارهایی می‌باشند که به وفور در صنایع بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند و از طرفی عملکرد صحیح آنها مستلزم وجود ولتاژ ثابت و عاری از هارمونیک می‌باشد [۱]. سقوط ولتاژ موقتی به علت ورود و خروج بارها یا خطاهای اتفاق افتاده در سیستم قدرت می‌تواند باعث ناپایداری موتورها شده و عملکرد صنایع سنگین را با خطر مواجه سازد. لذا جهت کاهش اثرات سوء سقوط ولتاژ موقتی باید تدابیری اندیشیده شود. کاربردی‌ترین روش جهت از بین بردن اثرات خطاهای ولتاژ، تزریق سریع توان راکتیو در محل بارها می‌باشد که جهت انجام این عمل تا بحال از جبران‌سازهای مختلفی استفاده شده است. اما امروزه بخاطر وجود وسایل بسیار حساس در سیستم قدرت، نیاز به استفاده از ادوات FACTS^۱ نسل جدید که دارای سرعت و قابلیت انعطاف بسیار زیاد می‌باشند احساس می‌شود [۲]. در این مقاله کاربرد یکی از ادوات قدرتمند FACTS در بهبود کیفیت ولتاژ در یک سیستم قدرت صنعتی نمونه شامل بارهای موتوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. این عنصر FACTS کنترل‌کننده یکپارچه توان^۲ (UPFC) بوده که قادر است علاوه بر نقش اصلی بهبود مشخصات حالت مانای سیستم قدرت، در حالت‌های گذرا و دینامیکی سیستم نیز اثرات مفیدی داشته باشد.

^۱ Flexible AC Transmission System

^۲ Unified Power Flow Controller

در این مقاله سیستمی مطابق شکل (۱) مورد توجه قرار می‌گیرد. این سیستم شامل یک شبکه تغذیه‌کننده خارجی، یک ترانسفورمر افزایشدهنده (T1)، یک خط انتقال دو مداره (L1, L2) و یک ترانسفورمر کاهشدهنده (T2) می‌باشد که در یک شین صنعتی گروهی از بارهای سه فاز را تغذیه می‌کند. بارهای سه فاز سیستم شامل یک مجموعه بار استاتیکی و چندین موتور آسنکرون می‌باشد. مسئله اصلی در این سیستم، بهبود پایداری موتورهای آسنکرون بزرگ متصل به شین مصرف‌کننده در حالت‌های مختلف عملکرد نظیر راه‌اندازی، بارگیری و اتصال کوتاه در شبکه می‌باشد.



شکل (۱): دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه

در این سیستم UPFC می‌تواند جهت مقاصد کنترل توان، بهبود کیفیت توان (حذف هارمونیک‌های ولتاژ و جریان، حذف فلیکتر، متعادل سازی شبکه و ...) با بالا بردن ظرفیت سیستم بکار گرفته شود. اما در اینجا به عملکرد این وسیله در راستای جبران‌سازی ولتاژ و بهبود عملکرد موتورهای پرداخته شده است. مطابق شکل (۱)، UPFC در نزدیکی مصرف‌کننده قرار داده شده است تا اینکه بتواند بیشترین تأثیر را بر روی ولتاژ و توان مصرف‌کننده داشته باشد و از طرفی در هنگام اتصالی و قطع یکی از خطوط انتقال بتواند توانایی و قابلیت سیستم را با وجود یک خط انتقال بالا ببرد.

۳- عملکرد UPFC

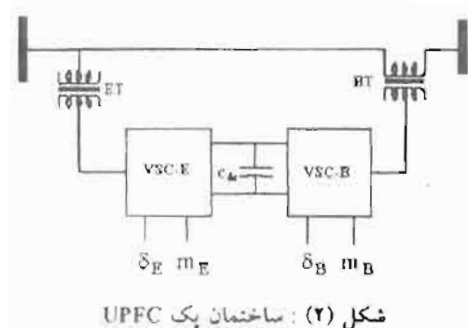
کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) یکی از ادوات FACTS می‌باشد که بر اساس مبدل‌های منبع ولتاژ^۱ کار می‌کند. ساختمان UPFC مطابق شکل (۲) شامل دو مبدل منبع ولتاژ (VSC) می‌باشد که یکی از آنها از طریق یک ترانسفورمر تحریک^۲ (ET) بصورت موازی به شبکه متصل می‌شود و دیگری بصورت سری از طریق یک ترانسفورمر تریقی^۳ (BT) به سیستم اتصال داده می‌شود. سمت DC هر دو مبدل با یک خازن مشترک می‌باشد. هر یک از اینورها از کلیدهای الکترونیک قدرت با قابلیت خاموش شدن نظیر GTO^۴ استفاده می‌کنند.

^۱ Voltage Source Converters

Excitation Transformer

^۲ Boosting Transformer:

Gate Turn Off thyristor



خروجی هر یک از اینورترها از لحاظ اندازه و فاز ولتاژ تولیدی توسط دو پارامتر مدولاسیون دامنه (m) و مدولاسیون زاویه فاز (δ)^۱ و با الگوریتم کلیدزنی PWM قابل کنترل می‌باشند [۳].

اینورتر موازی قادر است که جریان کنترل شده‌ای را بدون توجه به ولتاژ شین متصل شده، از شبکه بکشد و در عملکرد شبکه تأثیر داشته باشد و جبران‌سازی شنت را انجام دهد. اینورتر سری نیز مستقل از جریان خط انتقال می‌تواند یک ولتاژ با دامنه و زاویه فاز قابل کنترل به پهنورت سری به خط تزریق کند. جهت داشتن عملکرد صحیح میدلها، باید خازن DC دارای ولتاژی ثابت باشد و این امر توسط یکی از میدلها انجام خواهد شد [۴].

به هر حال UPFC با داشتن دو میدل و چهار پارامتر کنترلی $\delta_B, m_B, \delta_E, m_E$ قادر به کنترل بسیاری از پارامترهای سیستم قدرت خواهد بود. متناهی یکی از پارامترها بعلت نیاز به تثبیت ولتاژ خازن DC، وابسته خواهد بود [۳].

در سیستم مورد مطالعه، میدل موازی UPFC به شین مصرف‌کننده متصل شده و میدل سری در سمت خط انتقال قرار می‌گیرد. در این سیستم بطور خلاصه عملکرد میدلها بصورت زیر خواهد بود:

۳-۱- عملکرد میدل موازی

- تثبیت ولتاژ خازن DC

• تزریق توان راکتیو به بار به طوری که نیاز به انتقال توان راکتیو از طریق خطوط انتقال به طرف مصرف‌کننده‌ها نباشد و تنها توان اکتیو از خطوط انتقال عبور کند. در این صورت از دید شبکه بار صنعتی با ضریب توان واحد دیده خواهد شد.

۳-۲- عملکرد میدل سری

- تزریق ولتاژ بصورت سری با خط در مواقع افت ولتاژ یا اضافه ولتاژ جهت تثبیت ولتاژ شین بار. (جهت حذف فلیکر در سیستم قدرت مناسب می‌باشد).
- از بین بردن نامتعادلی در ولتاژهای رسیده به مصرف‌کننده

۳-۳- مدل‌سازی اجزای سیستم

→ روش آنالیز و نحوه بدست آوردن معادلات حاکم بر موتورهای AC، بارهای استاتیک و خطوط انتقال و منابع تغذیه در مراجع مختلف مربوط به ماشینهای الکتریکی و سیستم قدرت موجود می‌باشد و در اینجا از ذکر آنها خودداری می‌شود [۵]. برای UPFC نیز تا بحال مدل‌های زیادی در مقالات مختلف ارائه شده است. مرجع [۳] به طور مفصل کلیدها و نحوه کلیدزنی آنها را مورد بررسی قرار داده است و یک مدل مدار برای UPFC ارائه نموده است. در این مدل هر کدام از میدلها را می‌توان توسط پارامترهای m و δ خودشان کنترل نمود. ولتاژ تزریقی میدل سری از لحاظ دامنه و فاز بترتیب با

۱ Modulation Index and Phase Angle Index

۲ Pulse Width Modulation

پارامترهای δ_B, m_B کنترل می‌شود. و از طرفی با تغییر پارامترهای δ_E, m_E می‌توان دامنه و فاز ولتاژهای خروجی مبدل موازی را نیز تغییر داد.

معادلات دیفرانسیل و مقادیر مدار معادل بدست آمده برای UPFC در این مدل در مرجع فوق آمده است. در این مقاله نیز جهت شبیه‌سازی سیستم، از نرم افزار MATLAB استفاده شده است و همه جزئیات مدل‌های سیستم توسط نرم افزار فوق مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی از شبکه‌ای شامل یک موتور آسنکرون بزرگ استفاده شده است. مقادیر پارامترهای شبکه مورد مطالعه را می‌توان در پیوست ملاحظه نمود.

۵- طراحی کنترل کننده برای UPFC

همانگونه که اشاره شد در سیستم مورد مطالعه هدف اصلی، کنترل ولتاژ شینهای موتوری جهت داشتن عملکردی پایدار برای موتورها می‌باشد. با توجه به قابلیت‌های اشاره شده برای UPFC در این مقاله دو عمل توأم انجام می‌شود:

۱- توسط مبدل موازی UPFC توان راکتیو بار بطور کامل جبران‌سازی می‌شود و در این صورت تنها نیاز به انتقال توان اکتیو از طریق خط انتقال خواهد بود. این امر باعث می‌شود که افت ولتاژ شبکه بسیار کم شده و ولتاژ بتواند در حد یک پریونیت تثبیت شود و از طرفی ضریب توان بارها از دید شبکه واحد خواهد بود. از طرف دیگر مبدل موازی وظیفه تثبیت ولتاژ خازن DC را همزمان انجام می‌دهد.

۲- توسط مبدل سری UPFC در حالت‌های دینامیکی که افت ولتاژ یا اضافه ولتاژ ایجاد می‌شود ولتاژ بصورت سری با شبکه تزریق می‌شود و این عمل می‌تواند به تثبیت ولتاژ در حالت‌های دینامیکی منجر شود. از طرفی در حالت مانا نیز بعلافت افت ایجاد شده در مقاومتها و راکتانس‌های خط- که ناشی از جزء اکتیو جریان بار می‌باشد- ولتاژ شین بار ممکن است کمتر از یک پریونیت باشد که این کمبود نیز با جبران‌ساز سری قابل برطرف شدن می‌باشد.

با توجه به موارد اشاره شده در فوق می‌توان کنترل کننده را برای هر دو مبدل به شرح زیر طراحی نمود.

۵-۱- کنترل مبدل موازی

ستیلان توان اکتیو در شبکه‌های قدرت به زاویه اختلاف فاز بین ولتاژها بستگی دارد. از این رو با کنترل زاویه فاز ولتاژهای خروجی، مبدل موازی قادر به تبادل توان اکتیو با شبکه خواهد بود. از این خاصیت جهت تثبیت ولتاژ خازن DC در مبدل موازی UPFC استفاده می‌شود. پس بطور مستقل از بقیه پارامترها با کنترل زاویه فاز ولتاژ خروجی اینورتر موازی توسط پارامتر δ_E امکان تثبیت ولتاژ خازن DC وجود خواهد داشت. در این مقاله با نمونه‌گیری از ولتاژ خازن DC و مقایسه آن با مقدار مرجع و با استفاده از یک کنترل کننده تناسبی-انتهگرالی (PI) تثبیت ولتاژ خازن انجام می‌شود.

از طرفی ستیلان توان راکتیو بین دو منبع به اندازه ولتاژها بستگی دارد. با افزایش ولتاژ خروجی مبدل موازی نسبت به شین اتصال، توان راکتیو از سمت مبدل به سمت شین جاری می‌شود و بر عکس توان راکتیو می‌تواند توسط مبدل جذب شود. پس با نمونه‌گیری از مقدار توان راکتیو بار با تغییر پارامتر کنترل m_E می‌توان توان راکتیو تولیدی توسط مبدل موازی را طوری تنظیم نمود که بار را بطور کامل جبران‌سازی نماید.

۵-۲- کنترل مبدل سری

همانگونه که اشاره شد در این مقاله هدف اصلی استفاده از مبدل سری جبران افت ولتاژهای ایجاد شده در دو سر بار می‌باشد. لذا با نمونه‌گیری از ولتاژ بار و مقایسه آن با مرجع مورد نظر (یک پریونیت) ولتاژی بصورت سری با خط تزریق

می‌شود که خطای ولتاژ همواره صفر بماند. جهت داشتن حداکثر کارایی مبدل سری، ولتاژ تزریق شده بگونه‌ای تنظیم می‌شود که هم‌فاز (با دقیقاً معکوس) ولتاژ شین شبکه باشد و جمع کردن آن با ولتاژ شبکه باعث افزایش یا کاهش خیلی سریع در ولتاژ شین شود. از این رو با نمونه‌گیری از ولتاژ V_s در شکل (۱)، توسط پارامتر کنترلی δ_B زاویه فاز ولتاژ تزریقی سری برابر زاویه ولتاژ V_s تنظیم می‌شود و بسته به کم بودن یا زیاد بودن ولتاژ شین از مقدار یک پریونیت اندازه ولتاژ تزریقی زیاد یا کم خواهد شد.

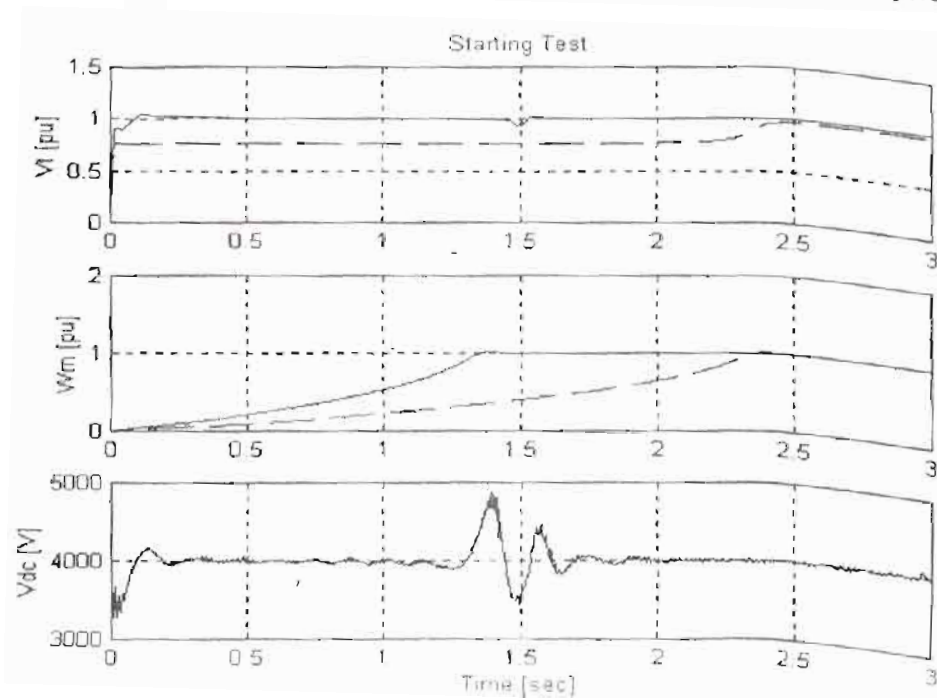
در اینجا نیز با توجه به مقادیر فیدبک اشاره شده، از یک کنترل کننده PI جهت عملکرد سیستم استفاده شده است.

۶- نتایج شبیه‌سازی

با توجه به نحوه کنترل UPFC و سیستم مورد نظر، شبیه‌سازی کامپیوتری برای سه حالت مختلف به شرح ذیل انجام شده است.

الف - حالت راه‌اندازی

در ابتدا فرض می‌شود که سیستم در شرایط عادی کار باشد و ناگهان موتورهای آسنکرون موجود و بارهای استاتیک به شبکه متصل شوند. این حالت در عمل به ندرت اتفاق می‌افتد ولی در اینجا بدترین حالت در نظر گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این حالت در شکل (۳) آمده است.



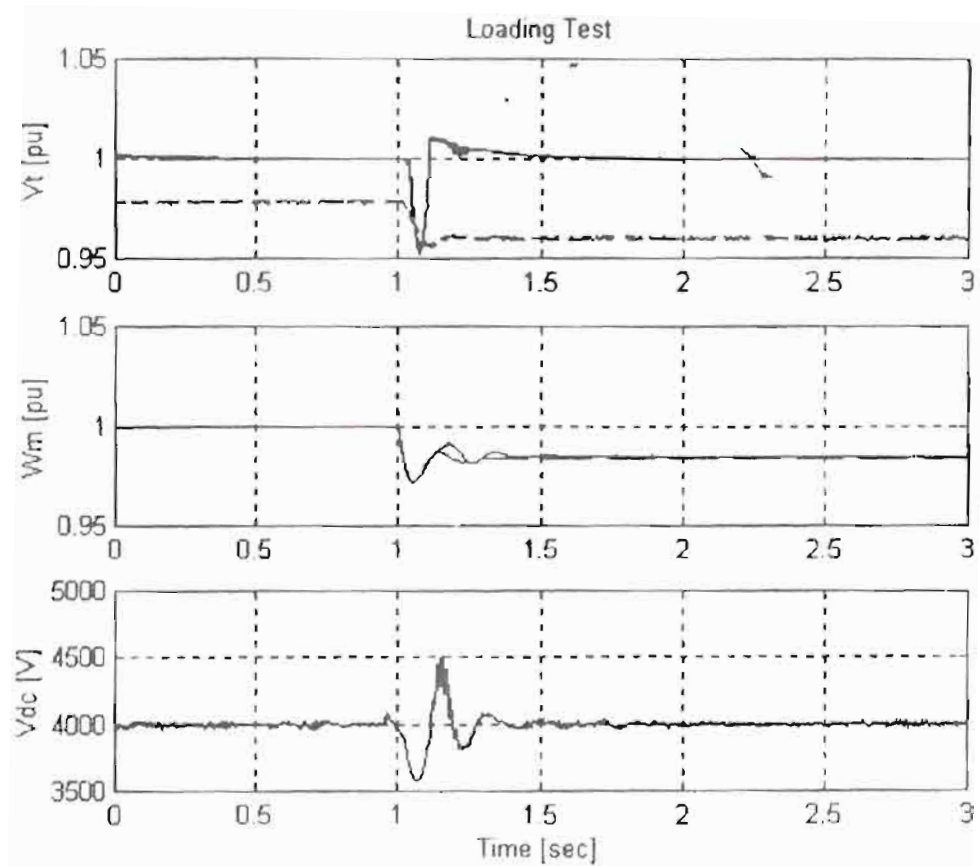
شکل (۳) : نتایج شبیه‌سازی حالت راه‌اندازی (— با وجود UPFC و - - - بدون جبران‌سازی)

پس از اتصال موتورها به شبکه، UPFC تحت استراتژی کنترلی اشاره شده با افت ولتاژ ایجاد شده مقابله می‌کند و پس از راه‌اندازی موتورها، همانگونه که در شکل (۳) دیده می‌شود، ولتاژ شین به یک پریونیت می‌رسد. بررسی شکل موجها نشان‌دهنده قابلیت این عنصر در بهبود حالت راه‌اندازی می‌باشد. در شکل (۳)، شکل موج مقیدار موثر ولتاژ شین اصلی و سرعت موتور در حالت وجود UPFC (منحنی توپر) و عدم وجود جبران‌ساز (منحنی خط چین) به همراه شکل موج ولتاژ خازن DC آمده است.

همانگونه که در شکل (۳) دیده می‌شود در هنگام راه‌اندازی موتور، UPFC ولتاژ را در حد بسک پریونیت تنظیم کرده و موتور در کمترین زمان راه‌اندازی می‌شود. اما در صورت عدم وجود UPFC افت ولتاژ حدود ۱۵ درصد باعث افزایش زمان راه‌اندازی موتور خواهد شد که عملاً موتور بخاطر مسایل حرارتی دچار مشکل خواهد شد.

ب - حالت بارگیری موتورها

در این حالت فرض می‌شود که موتورها در شرایط بی‌باری در حال کار باشند و ناگهان (در زمان $t=1$ sec) باری به اندازه یک پریونیت به موتورها اعمال شود. شکل (۴) موج مقدار موثر ولتاژ شین اصلی و سرعت موتور در حالت وجود UPFC (منحنی توپر) و عدم وجود جبران‌ساز (منحنی خط چین) به همراه شکل موج ولتاژ خازن DC را نشان می‌دهد.



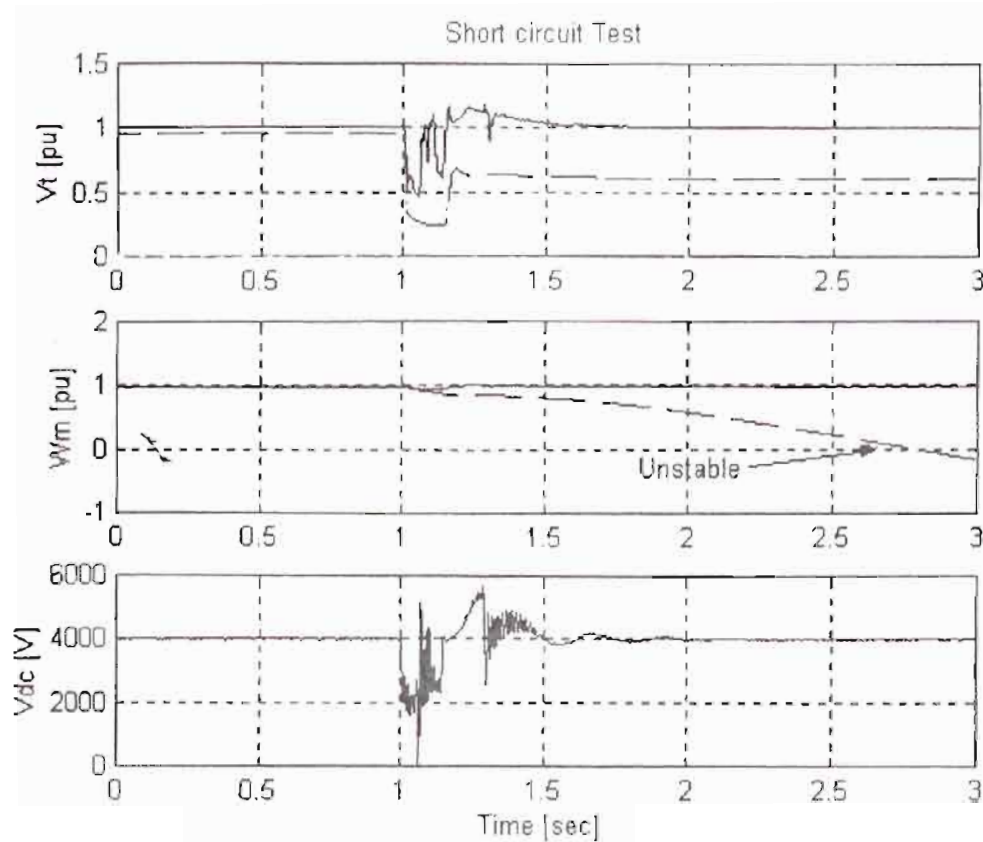
شکل (۴): نتایج شبیه‌سازی حالت بارگیری (— با وجود UPFC و --- بدون جبران‌سازی)

دیده می‌شود که در این حالت نیز افت ولتاژ بسیار کمی ایجاد شده و پس از بارگیری کامل دوباره ولتاژ به یک پریونیت می‌رسد. در حالیکه در حالت بدون جبران‌سازی ولتاژ شبکه افت کرده و هیچگاه به یک پریونیت نمی‌رسد.

ج - حالت اتصال کوتاه

در این حالت، اثر سقوط ولتاژ که بر اثر وقوع یک اتصال کوتاه سه فاز می‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرض می‌شود که موتورها راه‌اندازی و بارگذاری شده و سیستم به حالت دائم خود رسیده باشد. حال یک خطای اتصال کوتاه سه فاز در نقطه (شکل (۱)) به وقوع پیوسته و پس از ۸ سیکل با باز شدن کلیدهای B2 و B4 خطا برطرف می‌شود. شکل (۵) پروفیل ولتاژ در شین اصلی و تغییرات سرعت موتور را برای هر دو حالت وجود و عدم وجود UPFC نشان می‌دهد.

در این حالت ملاحظه می‌گردد که پس از رفع اتصال کوتاه و قطع یکی از خطوط انتقال، در حالت بدون جبران‌سازی موتور حالت پایدار خود را از دست داده است. اما UPFC باعث می‌شود که موتور همچنان به عملکرد پایدار خود ادامه داده و پس از چند نوسان، ولتاژ به مقدار یک پریونیت می‌رسد.



شکل (۵). نتایج شبیه‌سازی حالت اتصال کوتاه (— با وجود UPFC و - - بدون جبران‌سازی)

۷- نتیجه گیری

در این مقاله جهت بهبود پایداری موتورهای آسکرون موجود در یک شبکه صنعتی تغذیه شده از دور که در حالت عادی با مشکل سقوط ولتاژ مواجه می‌باشد، از کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC) استفاده شد. با کنترل مناسب UPFC می‌توان در حالت‌های راه‌اندازی و بارگیری و اتصال کوتاه و در طی بدترین شرایط، عملکرد پایدار موتورها را تضمین نمود. نکته قابل توجه این است که علاوه بر اینکه در همه موارد حالت دائم ولتاژ شین به اندازه یک پریونیت ثابت می‌ماند در حالت‌های دینامیکی نیز UPFC بهبود قابل توجهی در مشخصات موتورها ایجاد کرده است.

۸- مراجع

- [۱] حسن رستگار، مهرداد عابدی، محمدباقر منهای، سید حمیدفتحی. "طراحی کنترل کننده فازی برای SVC در تاسیسات صنعتی شامل بارهای موتوری القاشی تک قفسه‌ای و دو قفسه‌ای سه فاز". دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، وزارت نیرو، تهران، ایران، آبان ۱۳۷۶
- [۲] سید علی نبوی نیکی، حسن کجوری، "بکارگیری ادوات FACTS در سیستم‌های توزیع تحت مفهوم جدید Custom Power"، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی برق - تهران - ایران - ۱۳۷۸

[3] A.Nabavi Niaki, M.R.Iravani, " Steady-state and Dynamic Models of UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC) for power system studies", IEEE Trans. On Power systems, Vol. 11, No. 4, November 1996

[4] C.D schauder, D.M.Hammai, A.Edris "Operation of the Unified Power Flow Controller(UPFC) under practical constraints", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April 1998

[5] پال، سی. کراوز، ترجمه دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد و مهندس حسن نیک خواجوی، "تحلیل ماشینهای الکتریکی"، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، دیماه ۱۳۷۶.

پیوست

در این پیوست داده‌های سیستم تحت مطالعه آورده شده است.

شبکه خارجی بصورت یک منبع ولتاژ ایده‌آل (شبکه بینهایت) فرض شده است. بنابراین:

$$R_g = X_g = B_g = 0$$

جداول ۱ الی ۳ اطلاعات موتورآسنکرون، خطوط انتقال، ترانسفورمرها و بارهای استاتیک را ارائه می‌دهند. مقادیر امدانها در مبنای ولتاژ و توان نامی موتور آسنکرون بیان شده است و فرکانس سیستم ۶۰ هرتز می‌باشد.

جدول (۱)- پارامترهای موتور آسنکرون

Stator resistance (Rs)	0.0185 pu
Rotor resistance (Rr)	0.0132 pu
Stator leakage reactance (Xls)	0.085 pu
Rotor leakage reactance (Xlr)	0.085 pu
Magnetizing reactance (Xm)	3.81 pu
Inertia constant (H)	0.5265 s
Rated Power	500 hp
Number of poles	4
Rated Voltage	2300 V

جدول (۳) - پارامترهای بار استاتیک

R (pu)	0.4663
X (pu)	0.6217
Power factor	0.8
Rated power	1 MVA
Rated voltage	2300 V

جدول (۲) - پارامترهای خطوط انتقال

	R (pu)	X (pu)
L1	0.0189	0.1063
L2	0.0170	0.0957

پارامترهای UPFC :

مقدار خازن DC : ۳۰۰۰ میکرو فاراد

ولتاژ خازن DC : ۴۰۰۰ ولت

ترانسفورماتور تحریک (ET) : R=0.5% , X=10%

ترانسفورماتور تریق (BT) : R=0.5% , X=10%