

کمک به وضعیت دینامیک پست هنگام راه اندازی موتور القایی بزرگ با استفاده از SVC

فرهاد دانشی^۱، علی درویش فالچی^{۲*}

۱- مدیریت دفتر تحقیقات و استانداردها، شرکت توزیع نیروی برق اهواز، daneshifarhad@gmail.com

*۲- استادیار، گروه برق، دانشکده مهندسی، واحد شادگان، دانشگاه آزاد اسلامی، شادگان، ایران، falehi87@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۱۱

چکیده: جبران‌سازهای استاتیکی توان راکتیو^۱ به طور وسیعی برای بهبود تغییرات ولتاژ و ضریب قدرت حالت ماندگار در پست های برق کارخانجات و صنایع استفاده شده اند. بنابراین، این دو عملکرد مستقل از هم هستند و بهبود ضریب قدرت به منظور تنظیم ولتاژ ضروری است. در این مقاله، روش راه اندازی جدید با SVC برای موتورهای القایی پیشنهاد می گردد. در این روش، مقدار توان راکتیو به طور دقیق و قابل کنترل با توجه به نیازمندی های بار تامین می گردد. یک کنترل کننده ترکیبی شامل کنترل آهسته سوسپیتانس و کنترل سریع ولتاژ است که به SVC توانایی دستیابی به تصحیح ضریب قدرت را داده و یک مشخصه ولتاژ ثابت در طول راه اندازی موتور القایی بزرگ ایجاد می نماید. یک روش ایده آل جبران‌سازی برای هر دو مورد تنظیم ولتاژ بهینه و اصلاح ضریب قدرت پیشنهاد می گردد. یک مطالعه موردی روی راه اندازی موتور القایی بزرگ ۱/۴ MW با روش های راه اندازی متعدد ارائه می گردد. مطالعه مقایسه ای از طریق شبیه سازی با نرم افزار متلب برای موارد راه اندازی مختلف انجام می گیرد. در نهایت، نتایج شبیه سازی عملکرد ایمن و مطمئن روش پیشنهادی جهت طراحی موثر پست های عملیاتی را تضمین می نماید.

واژه های کلیدی: راه اندازی، جبران‌ساز، SVC، موتور القایی، رفتار دینامیکی

۱- مقدمه

به طور موقت اتفاق می افتد. در سال های اخیر، بسیاری از تحقیقات و مطالعات در مورد شروع موتور القایی انجام شده است [۳]. در بعضی مقالات، رفتار راه اندازی موتور القایی از طریق مقایسه روش های متداول شروع می شود. چندین تحقیق در مورد موتورهایی که از دستگاه های پشتیبانی ولتاژ مانند SVC و دستگاه (STATCOM) استفاده می کنند، مورد بحث قرار گرفته است. این دستگاه ها به طور گسترده ای برای غلبه بر مشکلات ولتاژ در هنگام راه موتور القایی و بدون در نظر گرفتن دینامیک موتور در طول استارت، مورد استفاده قرار گرفته است. در حالیکه STATCOM عملکرد بهتری را با سطوح مختلف ولتاژ دارد، SVC به دلیل هزینه کمتر مورد استفاده تر است. در تحقیقات قبلی در این زمینه، SVC در موتور به عنوان یک راه انداز واکنش نشان داده، و لازم نیست برای اصلاح ضریب توان باشد [۴، ۵]. توپولوژی کنترل مستقیم برای راه اندازی موتور با استفاده از تامین

موتورهای القایی بزرگ به طور گسترده در تمام کارخانه های صنعتی استفاده می شود و تولید بین المللی موتور القایی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. مزیت خودراه اندازی برای موتور القایی مورد استفاده و عدم وجود مدار خارجی برای شروع، خوب است، اما از طرف دیگر اثر موتور القایی بر روی کیفیت و موتور خود را نمی توان نادیده گرفت. هنگامی که ولتاژ بر روی موتور القایی اعمال می شود، مقدار زیادی جریان جاری می شود از ابزارهایی که به طور ناگهانی موجب شیب در ولتاژ سیستم می شود، که مقدار این شیب به اندازه جریان و امپدانس سیستم بستگی دارد. با توجه به ماهیت القایی مدار موتور در حالت استراحت، ضریب توان موتور القایی در شروع بسیار کم است، معمولاً در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد [۱، ۲]. این بدان معنی است که مولفه موثر در شروع، توان راکتیو است به دلیل ضریب توان کم، و ولتاژ پایین

عملکرد ایمن و مطمئن روش پیشنهادی جهت طراحی موثر پست‌های عملیاتی را تضمین می‌نماید.

۲- راه‌اندازی موتور القایی با توان بالا

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی نحوه راه‌اندازی موتور القایی ۱/۴ مگاواتی از یک پست برق ۱۱ کیلوولتی استفاده شده است. در این پست از دو نوع ترانسفورماتور ۶,۶kV/11kV و ۰,۴kV/11kV به همراه یک فیدر برای تغذیه موتور القایی ۱۱ kV بدون ترانسفورماتور استفاده شده است. برای سادگی شبیه‌سازی، بار معادل برای هر فیدر در نظر گرفته شده است. بار معادل متصل شده به ترانسفورماتور ۶,۶/۱۱ کیلوولتی با قدرت ۸ MVA برابر با ۲۷۷۰ kVA با ضریب قدرت ۰,۷۵ پس‌فاز است و بار معادل متصل شده به ترانسفورماتور ۰,۴/۱۱ کیلوولتی با قدرت ۷ MVA برابر با ۴۲۹۵ kVA با ضریب قدرت ۰,۸۱ پس‌فاز است. معیارهای مورد مطالعه برای هر روش راه‌اندازی شامل سه مورد اصلی خواهد بود:

- ۱- راه‌اندازی موتور با افت ولتاژ ترمینال مناسب
- ۲- راه‌اندازی موتور در زمان راه‌اندازی مجاز و گشتاور قابل قبول که اطلاعات در مورد بار مکانیکی با توجه به مدل موتور در سیمولینک لحاظ شده است.
- ۳- ولتاژ sag در طول راه‌اندازی موتور از محدوده مجاز آن بیشتر نخواهد شد (یعنی ۵٪ برای پست‌های فشار ضعیف و فشار متوسط و ۱۰٪ به عنوان محدوده بحرانی در نظر گرفته می‌شود).

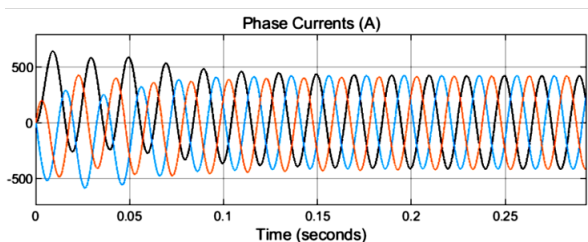
راه‌اندازی مستقیم موتور القایی (DOL)، ساده‌ترین، رایج‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش راه‌اندازی موتورهای القایی قفس سنجایی است. راه‌اندازی مستقیم گشتاور شتاب‌گیری بالایی ایجاد کرده و زمان شتاب‌گیری را کاهش می‌دهد. روش DOL در محیط سیمولینک متلب مدل می‌گردد.

۲-۱- مدل سیمولینکی

می‌دانیم، وقتی که ولتاژ نامی ترمینال به یک‌باره به یک موتور القایی که در حالت سکون است، اعمال گردد. یک گشتاور گذرای نوسانی ظاهر می‌گردد. بنابراین، این واقعیت به طور غیرمنتظره توسط بسیاری از کاربران صنعتی در نظر گرفته نشده است. گشتاور گذرای نوسانی بیش از حد زمانی رخ می‌دهد که ولتاژ منبع تغذیه به طور ناگهانی برای راه‌اندازی موتور القایی اعمال گردد. از آنجایی که این پدیده برای مدت طولانی رخ مدهد لذا کاربران صنعتی آگاهی کافی ندارند چون در استانداردهای عمومی هیچ توضیح واضحی وجود ندارد. بسته به این مورد، گشتاور گذرا مقدار بسیار بزرگی داشته و باعث آسیب گیربکس کمپرسور می‌گردد. در این مورد، یک مدل دینامیکی

ولتاژ به کنترل SVC اجرا شد، شامل بانک‌های خازن سوئیچ شونده شبیه آن‌چه در پست‌های صنعتی است. کنترل ساسپتانس هنگام استفاده از ولتاژ مرجع به علت اختلال کوچک، کمی تغییر می‌کند. در این حالت، کنترل ساسپتانس زمان به اندازه کافی برای خازن سوئیچ شونده مکانیکی می‌دهد تا توان راکتیو را به عنوان یک منبع مکمل جبران کند [۷]. روش کنترل SVC در این مطالعه موردی پیشنهاد شده است، علاوه بر کنترل ولتاژ، به منظور کنترل ضریب توان و اثرات ولتاژ ایستگاه توسط SVC، کنترل سوئیچی اضافه می‌شود. این طرح کنترل پیشنهادی برای تثبیت ولتاژ در هنگام راه‌اندازی موتور القایی و بهبود ضریب توان در پست در حالت پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸،۱۰]. این مقاله اطلاعات مربوط به یک مطالعه موردی موتور القایی ۱,۴ مگاوات را در ۱۱ کیلوولت و مصرف ۸۹۲۰ مگاوات ساعت در سال را با حدود ۱۰ درصد کل مصرف انرژی برای کل کارخانه نشان می‌دهد. جریان برق ایستگاه و مطالعه راه‌اندازی موتور القایی از طریق شبیه‌سازی انجام خواهد شد. در موتور القایی در این مطالعه موردی اتو ترانسفورماتور تعبیه شده است. ترانسفورماتور خودکار بعد از یک حادثه و اتصال کوتاه در ترانسفورماتور خودکار با یک سافت جایگزین شد [۱۳]. DOL در یک دوره بین ترانسفورماتور خودکار و راه‌اندازی نرم استفاده شد. در این مورد، شروع را می‌توان به چهار دسته اساسی تقسیم کرد:

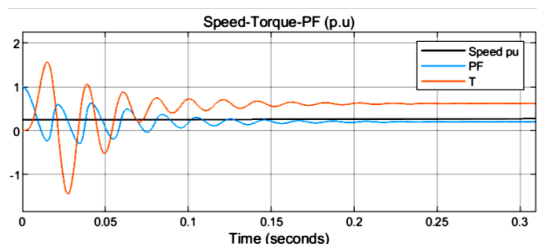
شروع بار گذاری با DOL، کاهش ولتاژ الکترومکانیکی (خودکار ترانسفورماتور)، ولتاژ پایین هنگام شروع به کار (راه‌اندازی نرم) و راه‌اندازی موتور پیشنهاد شده با SVC. سه روش اول به طور عملی در شرایط مختلف استفاده قرار می‌گیرد، با این حال بسیاری از مشکلات برای عملکرد موتور و رفتار دینامیکی پست ثبت شده است. تأثیر روش‌های مختلف راه‌اندازی در زمان شروع موتور، ولتاژ گشتاور و ولتاژ زیر شاخه‌ها با استفاده از پلتفرم ETAP تحلیل می‌شود. شروع به کار با SVC پیشنهاد شده است تا از اشکالات روش‌های قبلی جلوگیری شود. اثر SVC در ضریب توان پست به تحقیقات بیشتری کنترل‌کننده ساسپتانس پیشرفته نیاز دارد. [۱۵،۱۲،۱۱]. در این مقاله، روش راه‌اندازی جدید با SVC برای موتورهای القایی پیشنهاد می‌گردد. در این روش، مقدار توان راکتیو به طور دقیق و قابل کنترل با توجه به نیازمندی‌های بار تامین می‌گردد. یک کنترل‌کننده ترکیبی شامل کنترل آهسته سوسپتانس و کنترل سریع ولتاژ است که به SVC توانایی دستیابی به تصحیح ضریب قدرت را داده و یک مشخصه ولتاژ ثابت در طول راه‌اندازی موتور القایی بزرگ ایجاد می‌نماید. یک روش ایده آل جبران‌سازی برای هر دو مورد تنظیم ولتاژ بهینه و اصلاح ضریب قدرت پیشنهاد می‌گردد. یک مطالعه موردی روی راه‌اندازی موتور القایی بزرگ MW1.4 با روش‌های راه‌اندازی متعدد ارائه می‌گردد. مطالعه مقایسه‌ای از طریق شبیه‌سازی با نرم افزار متلب برای موارد راه‌اندازی مختلف انجام می‌گیرد. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی



شکل ۵: جریان راه اندازی حالت گذرای موتور با روش DOL

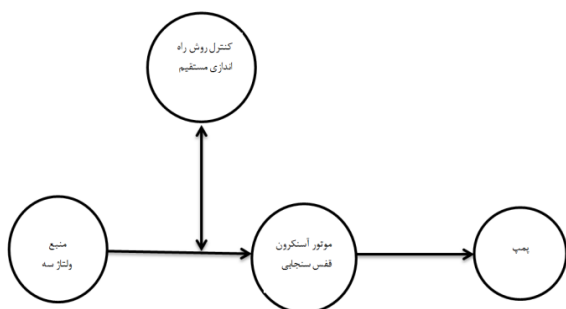
باتوجه به شکل های ۴ و ۵ و بعد از تغییر شرایط منبع تغذیه طی زمان طولانی، گشتاور گذرا برای موتور القایی به صورت زیر خلاصه می-گردد:

نوسانات گذرای گشتاور مربوط به این موتور القایی هنگامی رخ می دهد که ولتاژ نامی به طور مستقیم به ترمینال های موتور اعمال می گردد. دامنه و طول مدت این نوسانات گذرای گشتاور تحت تاثیر شیفت فاز منبع تغذیه قرار نمی گیرند. مقدار گشتاورهای گذرا معمولاً یا بین ۴ تا ۶ پریونیت بوده یا بیش از مقدار گشتاور نامی بسته به جریان راه اندازی موتور می باشد. فرکانس نوسان گشتاور معادل با فرکانس منبع تغذیه است. گشتاور گذرا بیانگر جنبه های مختلف پارامترهای ماشین از جمله اینرسی روتور موتور القایی و بار است.



شکل ۶: رفتار گذرای موتور در روش DOL

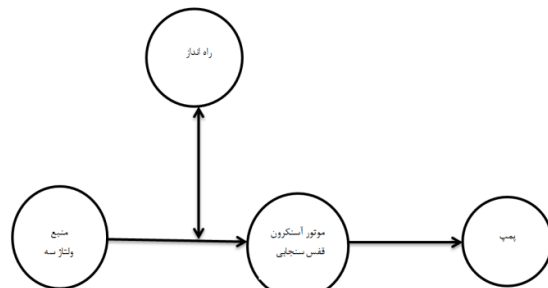
دیگرام تک خطی در شکل ۷، شبیه سازی دینامیکی موتور القایی ۱/۴ مگاواتی در طول شتاب گیری آن در محیط سیمولینک متلب مطابق شکل ۸ انجام گرفته است. نتایج این شبیه سازی در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شدند.



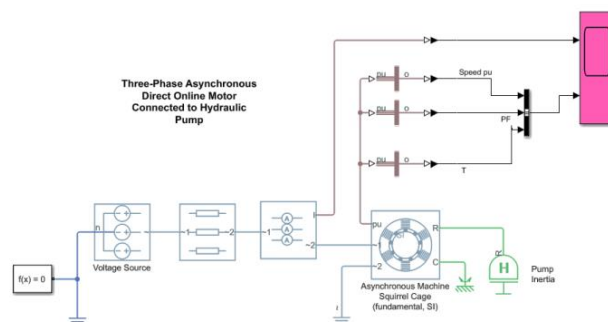
شکل ۷: مدل تک خطی راه اندازی موتور با روش DOL

بعد از اجرای برنامه، شتاب گیری موتور بدون ادوات راه اندازی آغاز می شود. افت ولتاژ نهایی به دست آمده در شبیه سازی نشان می دهد که همه باس های پایین دست شینه 11kV تحت تاثیر این افت ولتاژ مطابق شکل ۱۱ قرار می گیرند.

سیمولینکی با راه اندازی DOL^۲ برای مشاهده این پدیده انجام می-گیرد. نتایج حاصل از این مدل می تواند شکل دقیقی برای گشتاور گذرا در روش های راه اندازی دیگر ارائه دهد. مقادیر گشتاور گذرا بایستی زمانی که در محدوده مجاز قرار دارند، بررسی گردد. شکل ۱ دیگرام تک خطی، شکل ۲ طرح شبیه سازی و شکل های ۳ و ۴ رفتار دینامیکی موتور در طول کل دوره راه اندازی را نشان می دهند.

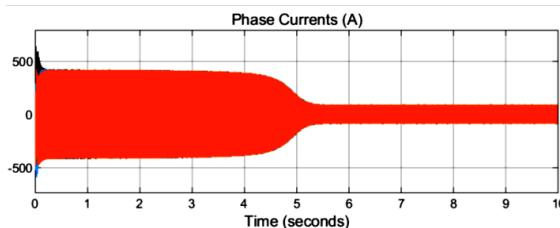


شکل ۱: مدل تک خطی راه اندازی موتور

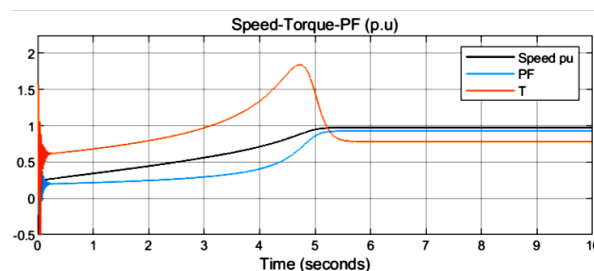


شکل ۲: مدل دینامیکی موتور در فضای سیمولینک متلب

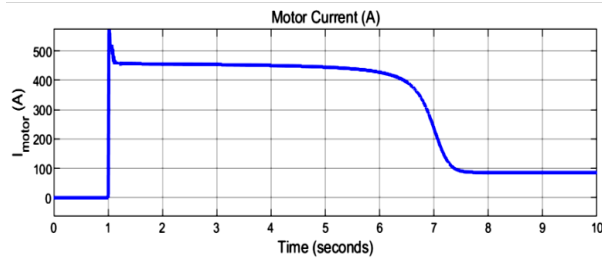
شکل های ۵ و ۶ نتایج شبیه سازی حالت های گذرای موتور در آغاز دوره راه اندازی و رفتار گذرای جریان، گشتاور و ضریب قدرت را برای موتور نشان می دهند.



شکل ۳: جریان راه اندازی موتور با روش DOL



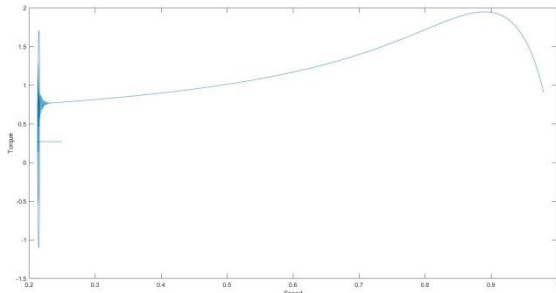
شکل ۴: رفتار دینامیکی موتور با روش DOL



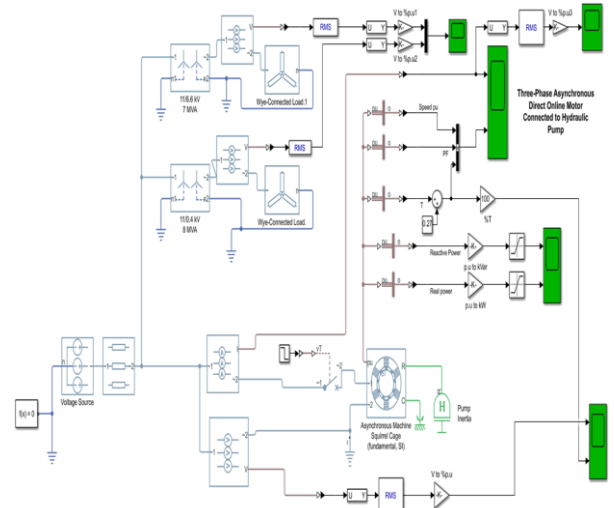
شکل ۱۲: جریان راه‌اندازی موتور در طول روش DOL

منحنی‌های DOL مذکور داده‌های اصلی درباره ولتاژهای باس و مشخصه‌های سرعت موتور، جریان راه‌اندازی و گشتاور مربوط به راه‌اندازی مستقیم را نشان می‌دهند. شکل ۹ ولتاژ ترمینال موتور و مشخصات گشتاور-سرعت را نشان می‌دهد. به جای رابطه لغزش-گشتاور، رابطه گشتاور - زمان تصویر روشنی از زمان راه‌اندازی موتور ارائه می‌دهد که حدود ۶ ثانیه است. ولتاژ ترمینال کمتر از حد مجاز است. در شکل ۱۰ رابطه بین توان‌های اکتیو و راکتیو با طول دوره راه‌اندازی نشان داده شده است. واضح است که بزرگ‌ترین بخش توان راه‌اندازی مربوط به توان راکتیو است. ولتاژ باس های ۰,۴kV و ۶,۶kV با توجه به شکل ۱۱ در طی دوره راه‌اندازی با روش DOL دچار افت خواهند شد. باس 6.6kV بیشترین افت ولتاژ را دارد که ولتاژ آن به ۸۹٪ می‌رسد. ولتاژ باس ۰,۴ kV نیز حدود ۹۰٪ خواهد شد. شکل ۱۲ جریان راه‌اندازی موتور در طی DOL را نشان می‌دهد و مقدار آن تقریباً پنج برابر مقدار جریان نامی است.

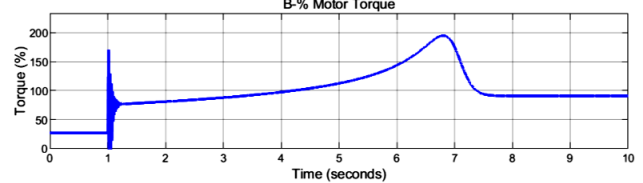
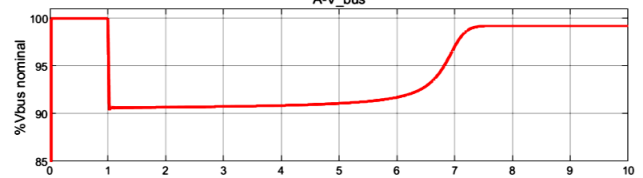
در شکل ۱۳ منحنی گشتاور سرعت در راه‌اندازی DOL نشان داده شده است. راه‌اندازی DOL بعد از حذف اتوترانسفورماتور باعث طولانی شدن زمان راه‌اندازی گردید. باس‌های دور دست نیز در طی راه‌اندازی موتور با نوسانات ولتاژ مواجه می‌شوند. سافت استارتر بعد از عدم موفقیت اتوترانس راه حل پیشنهادی بعدی است.



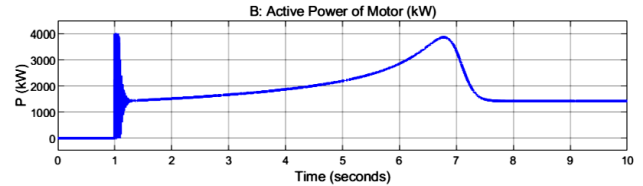
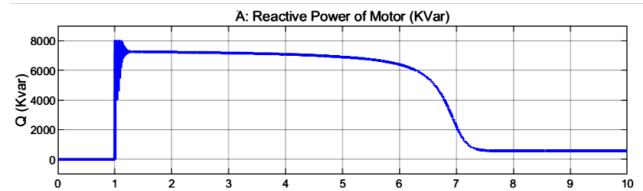
شکل ۱۳: منحنی گشتاور-سرعت در روش DOL



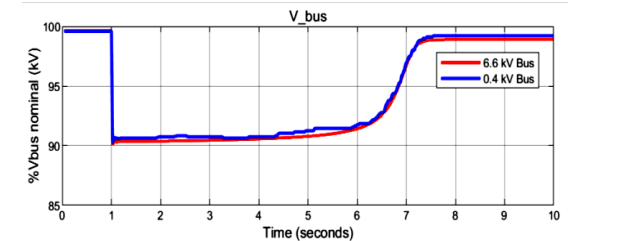
شکل ۸: شبیه‌سازی رفتار دینامیکی موتور القایی با روش DOL به همراه فیدرهای 0.4kV و 6.6kV



شکل ۹: A: ولتاژ ترمینال ۱۱ کیلوولت با راه‌اندازی مستقیم (DOL) B: گشتاور موتور با روش راه‌اندازی DOL



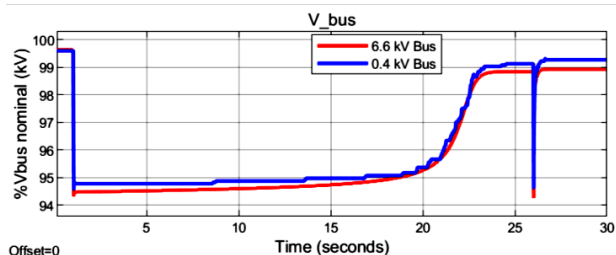
شکل ۱۰: A: توان راکتیو مصرفی موتور با راه‌اندازی DOL B: توان اکتیو مصرفی موتور با راه‌اندازی DOL



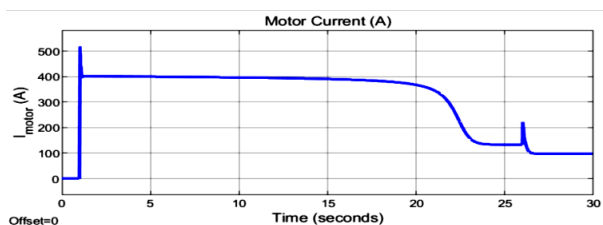
شکل ۱۱: ولتاژ sag ایجاد شده در سویچ‌گیرهای 0.4 kV و 6.6kV تحت راه‌اندازی DOL

۲-۲- راه اندازی با اتوترانسفورماتور

گشتاور موتور و گشتاور بار بین لحظات ۱۰ تا ۲۰ ثانیه را نشان می‌دهد. دوره راه اندازی تا ۲۲ ثانیه افزایش می‌یابد. در نتیجه سوئیچ‌گیر دور دست در اثر راه اندازی مستقیم موتور دچار ولتاژ sag طولانی مدت خواهد شد. جریان راه اندازی در شکل ۱۶ برابر با ۴۰٪ است. این امر باعث می‌گردد که وضعیت حرارتی موتور در هنگام راه اندازی به مقدار ظرفیت حرارتی آن افزایش یابد. در مرحله بعدی اتوترانس حذف شده و جای خود را به سافت استارتر می‌دهد.



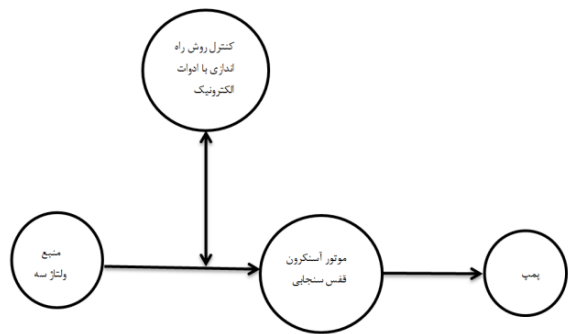
شکل ۱۶: ولتاژ باس‌های 0.4kV و 6.6kV در راه اندازی با اتوترانسفورماتور



شکل ۱۷: جریان موتور با روش راه اندازی اتوترانسفورماتور

۲-۳- روش راه اندازی با سافت استارتر

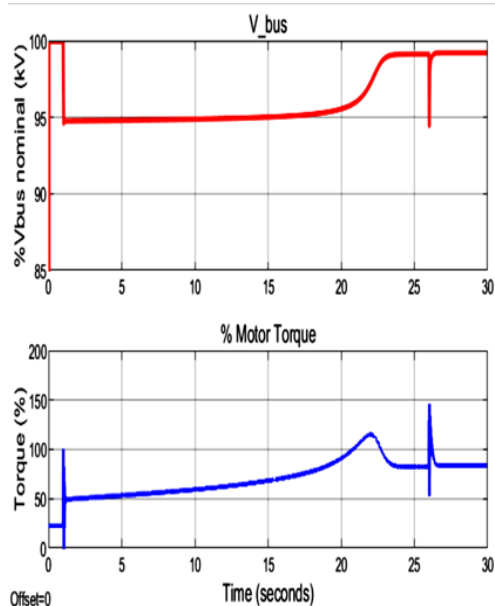
ماژول سافت استارتر از نیمه هادی‌های SCR استفاده می‌کند. با کنترل زاویه آتش SCR، ولتاژ تولیدی سافت استارتر می‌تواند در طی راه اندازی موتور با محدود نمودن عبور توان کنترل گردد. سپس شیب ولتاژ اعمالی تا زمانی که به محدودیت ولتاژی برسد ادامه می‌یابد و بعد از آن جریان شتاب دهنده موتور ثابت می‌ماند. در روش سافت استارتر، به موتور یک گشتاور تنظیمی اولیه توسط کاربر داده می‌شود که از صفر تا ۹۰٪ گشتاور روتور قفل قابل تنظیم است. ولتاژ خروجی موتور از سطح گشتاور اولیه در طول زمان شتاب‌گیری افزایش می‌یابد. زمان شتاب‌گیری از ۰ تا ۳۰ ثانیه توسط کاربر قابل تنظیم است. شکل ۱ مدل دیاگرام تک خطی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: مدل تک خطی راه اندازی موتور با روش ادوات الکترونیک قدرت

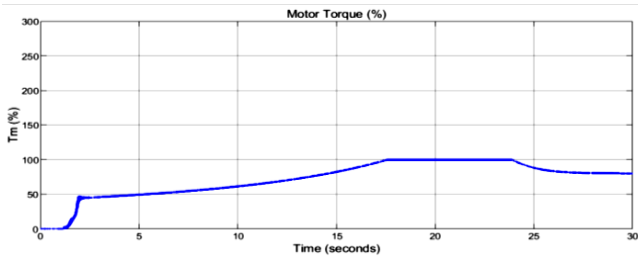
این روش به عنوان یک روش راه اندازی ولتاژ کاهش یافته با به کارگیری تجهیزات الکترومکانیکی استفاده می‌گردد که در آن ترمینال‌های موتور به سمت فشار ضعیف اتوترانس متصل می‌گردد. رایج‌ترین تپ‌هایی که به کار می‌روند، ۸۰٪، ۶۵٪ و ۷۵٪ هستند. در این مورد، ۷۵٪ ولتاژ نامی برای ولتاژ راه اندازی موتور در نظر گرفته می‌شود و جریان اولیه به ۷۰٪ مقدار جریان روتور قفل موتور کاهش می‌یابد. موتور با این جریان ولتاژ کاهش یافته راه اندازی شده و بعد از ۲۵ ثانیه توسط یک کلید قدرت خلا اتصال اتوترانس قطع شده و پایانه‌های موتور به شبکه اصلی متصل می‌شوند. لحظه کلیدزنی در ثانیه ۲۶ اتفاق می‌افتد که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. راه اندازی دینامیکی موتور در شکل ۱۵ نشان داده می‌شود. از آنجا که گشتاور تولیدی موتور با توان دو ولتاژ اعمالی تغییر می‌نماید، لذا گشتاور راه اندازی از ۸۰٪ تا ۴۵٪ گشتاور نامی در راه اندازی با اتوترانس کاهش می‌یابد.

گشتاور موتور بایستی متناسب با گشتاور بار کامل آن در تمام نقاط منحنی مطابق شکل ۱۵ باشد. زمان شتاب‌گیری برای اطمینان از این که موتور ظرفیت گرمایی کافی برای کنترل حرارت تولید شده در اثر زمان شتاب‌گیری طولانی را دارد، باید ارزیابی گردد. منحنی‌های دینامیکی برای ولتاژهای باس در سیمولینک یک بهبود بسیار خوب در ولتاژهای فشار ضعیف و فشار متوسط را نشان می‌دهد.

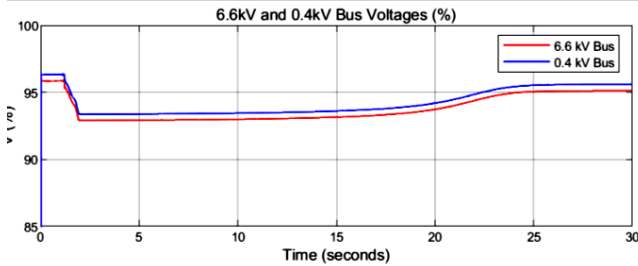


شکل ۱۴ و ۱۵: ولتاژ باس 11kV و گشتاور موتور در روش راه اندازی با اتوترانسفورماتور

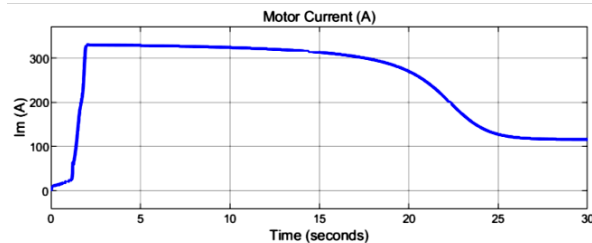
شکل ۱۶ یکی از شیب‌های سوئیچ‌گیر را نشان می‌دهد که اولین نگرانی در مطالعه مورد نظر به حساب می‌آید. گشتاور منتهی به خوبی ولتاژهای باس نیست. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار گشتاور در راه اندازی به‌طور قابل توجهی از ۲۰۰٪ به زیر ۱۵۰٪ کاهش می‌یابد. در حقیقت، این نتیجه مورد انتظار بود. شکل ۱۴ آفست بسیار کم بین



شکل ۲۱: گشتاور موتور در حین راه‌اندازی با سافت استارتر



شکل ۲۲: ولتاژ باس های 0.4kV و 6.6kV در حین راه‌اندازی با سافت استارتر

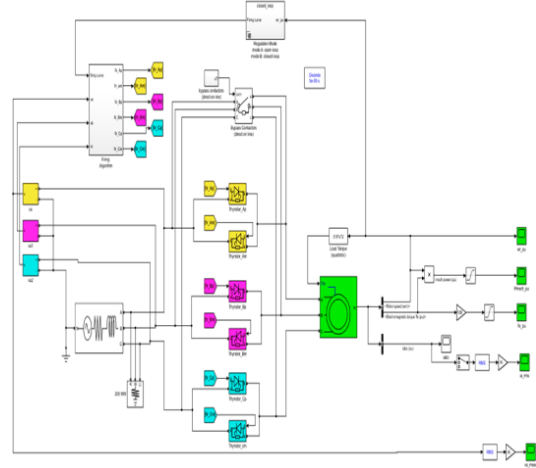


شکل ۲۳: جریان موتور در طول راه‌اندازی با سافت استارتر

۲-۴- راه‌اندازی با استفاده از SVC پیشنهادی

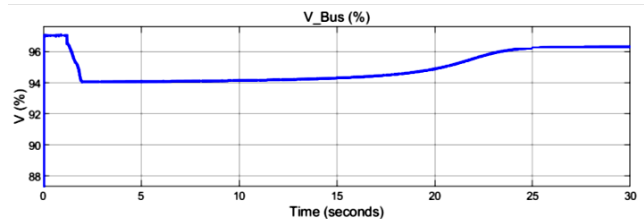
SVC یکی از ادوات سیستم‌های انتقال AC انعطاف پذیر (FACTS) می‌باشد که با به‌کارگیری الکترونیک قدرت توان عبوری در شبکه‌های قدرت را کنترل کرده و به طور موفقیت آمیزی در کاربردهای صنعتی پیاده‌سازی شده است. SVC ولتاژ پایانه‌های خود را با کنترل مقدار توان راکتیو تزریقی به شبکه یا جذب آن از شبکه قدرت با تنظیم ولتاژ مرجع یا سوسپتانس مرجع تنظیم می‌کند. هنگامی که ولتاژ سیستم پایین است، SVC توان راکتیو تولید می‌کند (مُد خازنی) و وقتی که ولتاژ سیستم بالاست، توان راکتیو از شبکه جذب می‌نماید (مُد سلفی). تغییر توان راکتیو با کلیدزنی بانک‌های خازنی و کنترل بانک‌های سلفی انجام می‌گیرد. ساختار پیشنهادی SVC شامل خازن کلید شونده تریستوری (TSC) به عنوان منبع خازنی و راکتور کنترل شونده تریستوری (TCR) به عنوان منبع سلفی است. TCR به طور خطی برای تولید اندوکتانس یا برای صاف نمودن ظرفیت خازنی خروجی با به‌کارگیری کنترل فاز کنترل می‌گردد. در این مطالعه یک TCR با نوع TSC برای غلبه بر ولتاژ sag در طول راه‌اندازی موتور به کار می‌رود و در نتیجه با به‌کارگیری SVC به جای بانک خازنی ثابت ضریب قدرت بهبود می‌یابد. جبران‌ساز TSC-TCR با کنترلر SVC در شکل ۲۴ نشان داده شده است.

هنگامی که کنترلر فشار متوسط احساس کند که موتور به شرایط حداکثر سرعت در طول شیب افزایشی ولتاژ رسیده است، آنگاه ولتاژ خروجی به طور خودکار به ولتاژ نامی سوئیچ می‌گردد و کلید بای‌پس بسته می‌شود. مدار پیاده‌سازی یک نمونه سافت استارتر که در محیط متلب پیاده‌سازی شده در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

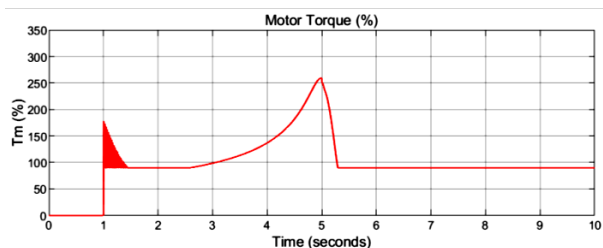


شکل ۱۹: مدار سافت استارتر با کلیدهای SCR

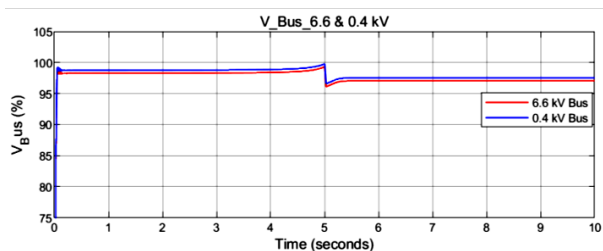
منحنی‌های دینامیکی ولتاژ باس در سیمولینک متلب نشان از بهبودی ولتاژ باس‌های فشار متوسط و فشار ضعیف دارد که در شکل‌های ۲۰ و ۲۲ نشان داده شده‌اند. نتایج دیگری چون گشتاور و سرعت، عملکرد مشابهی با روش قبلی دارند. شکل ۲۱ آفست بسیار کم بین گشتاور موتور و گشتاور بار بین زمان‌های ۱۰ تا ۲۰ ثانیه را نشان می‌دهد. گشتاور شتاب‌گیری پایین‌تر باعث طولانی‌شدن زمان راه‌اندازی خواهد شد. بهترین نتیجه در این روش مربوط به محدود شدن جریان است که مطابق شکل ۱۹ از ۳۵۰٪ تجاوز نمی‌نماید. این جریان کمتر از جریان راه‌اندازی با روش اتوترانسفورماتور است و این امر باعث کاهش تنش‌های حرارتی موتور در حین راه‌اندازی می‌گردد. عملکرد صاف برای ولتاژ و جریان ترمینال قبل و بعد از کلیدزنی آشکار است. همچنین گشتاور موتور در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ بدون ریپل در هنگام بای‌پس نشان داده شده است. طول دوره راه‌اندازی در سافت استارتر نسبت به اتوترانس بیشتر است اما جریان راه‌اندازی مقدار کمتری دارد. بنابراین، انرژی در طول دوره راه‌اندازی تقریباً یکسان است و همیشه یک زمان از پیش تعیین شده در سافت استارتر برای زمان شتاب‌گیری وجود دارد.



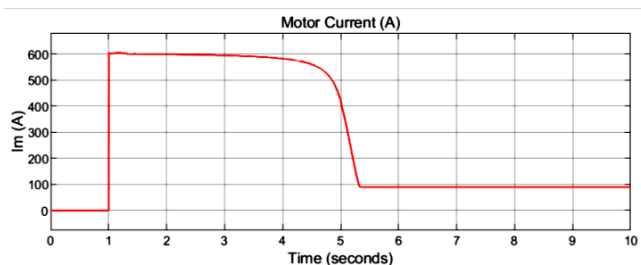
شکل ۲۰: ولتاژ باس 11kV تحت راه‌اندازی با سافت استارتر



شکل ۲۶: گشتاور موتور در طول راهاندازی با روش SVC



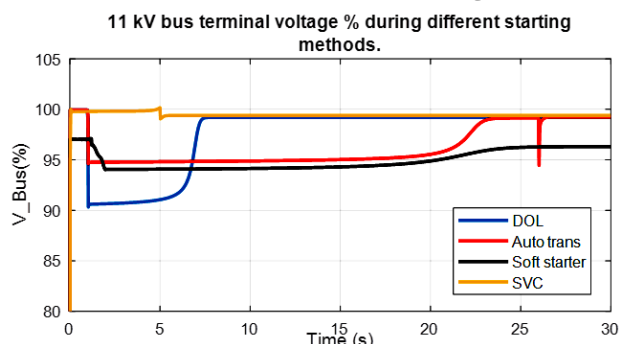
شکل ۲۷: ولتاژ باسهای 0.4kV و 6.6kV با روش راهاندازی SVC



شکل ۲۸: جریان موتور در طی راهاندازی با SVC

۳- نتایج مقایسه‌ای

در این بخش، مقایسه گرافیکی بین روش‌های راهاندازی موتور القایی انجام شده است که در آن شکل ۲۹ ولتاژ sag ناشی از راهاندازی موتور در شین 11kV تحت سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۳۰ مشخصه‌های گشتاور موتور با همین معیارها را نشان می‌دهد و در نهایت شکل ۳۱ رفتار جریان راهاندازی تحت روش‌های مختلف راهاندازی موتور را نشان می‌دهد.

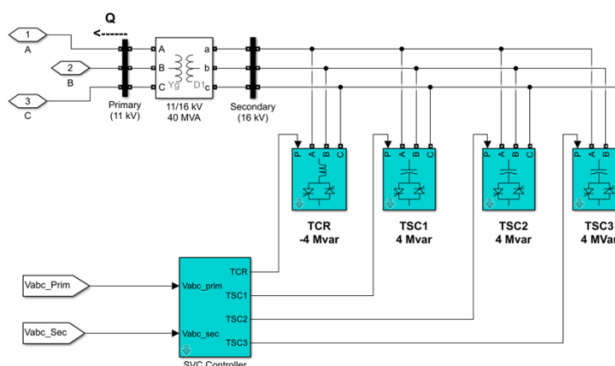


شکل ۲۹: ولتاژ باس 11kV تحت روش‌های راهاندازی مختلف

TSC به سه واحد معادل تقسیم می‌شود که هر واحد دارای ظرفیت ۴Mvar است در حالی که TCR یک واحد 4Mvar است. این ترکیب باعث می‌شود کنترل توان راکتیو به صورت صاف و بدون تغییر ناگهانی در تبادله توان راکتیو انجام گیرد.

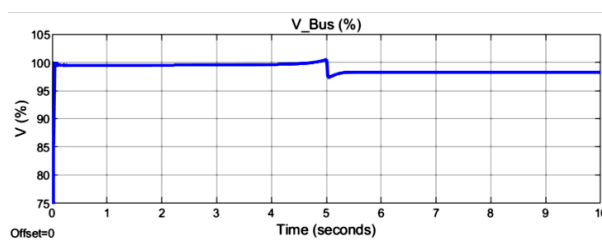
۲-۵- راه اندازی موتور با SVC پیشنهادی

منحنی‌های دینامیکی خلاصه شده برای ولتاژ باس‌ها در سیمولینک، بهبود قابل توجه در ولتاژ باس‌های فشار متوسط و فشار ضعیف را نسبت به روش‌های قبلی نشان می‌دهد و ولتاژ تقریباً در همه باس‌ها مطابق شکل‌های ۲۵ و ۲۷ به اندازه ۱٪ افت می‌کند. منحنی‌های مشخصه گشتاور-سرعت در شکل ۲۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افت ولتاژ ترمینال‌ها در طول راهاندازی DOL بسیار کم است.



شکل ۲۴: بلوک دیاگرام ساختار TSC-TCR کنترل شده با SVC

SVC در به حداقل رساندن بازه زمانی راهاندازی نسبت به روش‌های دیگر راهاندازی موفقیت آمیز عمل کرده و در مقایسه با روش‌های قبلی بهترین پروفیل ولتاژ را دارد. گشتاور موتور بهترین عملکرد را با توجه به منحنی مشخصه گشتاور-سرعت دارد.



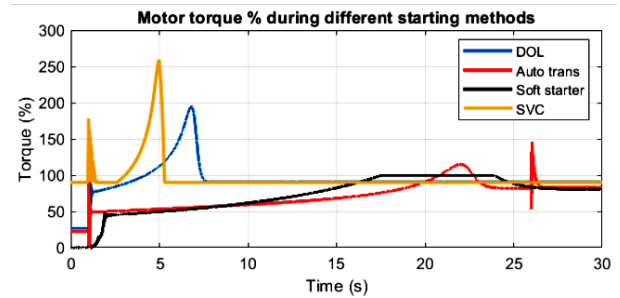
شکل ۲۵: ولتاژ باس 11kV با روش راهاندازی از طریق SVC

شکل ۲۶ گشتاور شتاب‌گیری را در دوره بحرانی یکسان با آفست خوبی نشان می‌دهد. دوره راهاندازی کمتر از ۴/۶ ثانیه است که در شکل ۲۸ نشان داده شده است در حالی که جریان راهاندازی به طور جزئی کمی بیشتر از جریان راهاندازی با روش DOL است.

مشاهده و تحلیل کرد. مزایا و معایب روش‌های راه‌اندازی مختلف بررسی شد. یک کنترل مرجع ترکیبی با SVC پیشنهاد گردید. در چنین طرحی، روش راه‌اندازی با SVC عملکرد بهتری نسبت به روش‌های راه‌اندازی دیگر دارد. راه‌اندازی موتور با SVC گشتاور شتاب‌گیری را افزایش می‌دهد و زمان راه‌اندازی کوتاه‌تری ایجاد می‌نماید. به کارگیری SVC در طول راه‌اندازی موتور پروفیل ولتاژ بهتری را برای تمام سطوح ولتاژ پست بدون تحت تاثیر قرار دادن گشتاور راه‌اندازی موتور ایجاد می‌کند. SVC با کنترل مراجع ترکیبی می‌تواند باعث بهبود ضریب قدرت از طریق کنترل سوسپتانس آرام و پشتیبانی ولتاژ از طریق کنترل تنظیم ولتاژ سریع گردد. حالت‌های گذرای پست با به کارگیری روش راه‌اندازی پیشنهادی با SVC باعث بهبود هم‌زمان پروفیل ولتاژ و ضریب قدرت می‌گردد. افت ولتاژ در طول راه‌اندازی با SVC از ۱۱٪ به ۱٪ با عملکرد بهتر موتور کاهش می‌یابد. ضریب قدرت از ۹۰٪ به ۹۹٪ با SVC افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی عملکرد ایمن و قابل اطمینان در طراحی عملیاتی پست‌ها را فراهم می‌نماید.

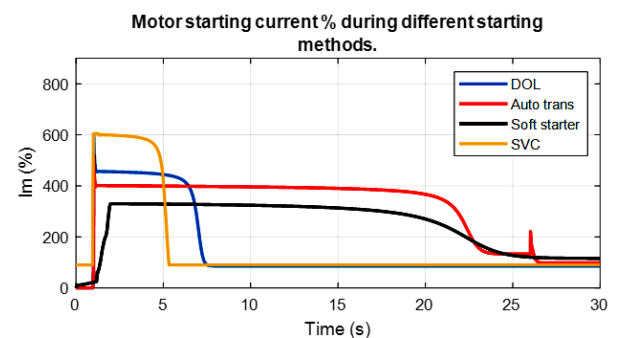
مراجع

- [1] Z.M.S. El-Barbary, Fuzzy logic based controller for five-phase induction motor drive system, Alexandria Eng. J. (AEJ) 51(2012) 263–268
- [2] V. Sreeram, M.V. Supriya, Fault current discrimination during induction motor starting, in: IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), 2016, pp. 1–4.
- [3] D.S. Padimiti, M.B. Christian, J. Jarvinen, Effective transient free capacitor switching (TFCS) for large motor starting on MV systems, in: Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2017, pp. 113–124.
- [4] M. Habyarimana, D.G. Dorrell, Methods to reduce the starting current of an induction motor, in: IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), 2017, pp. 34–38.
- [5] P.S. Patil, K.B. Porate, Starting analysis of induction motor: a computer simulation by Etap Power Station, in: Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, 2009, pp. 494–499.
- [6] H. Zhu, X. Liu, N.E. Mastorakis, The simulation analysis of motor startup based on the ETAP platform, in: International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry, 2014, pp. 245–248.
- [7] M.Z. El-Sadek, N.H. Fetih, F.N. Abdelbar, Starting of induction motors by static VAR compensators, in: International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1988, pp. 444–447.
- [8] L.S. Patil, A.G. Thosar, Application of D-STATCOM to mitigate voltage sag due to DOL starting of three phase induction motor, in: International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009, pp. 1–4.
- [9] A. Qatamin et al, SVC versus STATCOM for improving power system loadability: A case study, in: 8th International Renewable Energy Congress (IREC), Amman, 2017, pp. 1–4.
- [10] M.R. Banaei, E. Salary, Mitigation of voltage sag, swell and power factor correction using solid-state transformer



شکل ۳۰: گشتاور موتور تحت روش‌های راه‌اندازی مختلف

شکل ۲۹ نشان می‌دهد که ولتاژ sag تقریباً در روش DOL بحرانی است در حالی که حاشیه‌ای برای روش‌های راه‌اندازی متداول دیگر وجود دارد. راه‌اندازی موتور با SVC بهترین پروفیل ولتاژ در سوئیچ‌گیر ۱۱ kV با افت ولتاژ ۱٪ دارد. دوره شتاب‌گیری با روش DOL کوتاه‌تر شده و دقیقاً ۶ ثانیه به طول می‌انجامد در حالی که این مقدار برای اتوترانس و سافت استارتر به ترتیب ۲۲ و ۲۶ ثانیه طول می‌کشد. با این وجود، دوره راه‌اندازی موتور با SVC تقریباً ۴/۶ ثانیه طول می‌کشد. با توجه به شکل ۳۰، بهترین عملکرد گشتاور برای موتور در طول راه‌اندازی با SVC اتفاق می‌افتد در حالی که راه‌اندازی مستقیم (DOL) مشخصه گشتاوری تقریباً نزدیک به مشخصه SVC دارد. دو روش دیگر تقریباً با یکدیگر مشابهند دلیل این امر دسته بندی یکسان آنها در کاهش ولتاژ راه‌اندازی است. شکل ۳۱ نشان می‌دهد که بیشترین جریان راه‌اندازی با روش SVC و در ۵۹۰٪ رخ می‌دهد در حالی که راه‌اندازی با سافت استارتر جریان را محدود کرده و به ۳۵۰٪ کاهش می‌دهد. جریان راه‌اندازی در روش اتوترانس با ۴۰٪ شروع می‌شود و در پایان دوره راه‌اندازی به ۳۰٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۳۱: جریان موتور تحت روش‌های مختلف راه‌اندازی

۴ - نتیجه گیری

در این مقاله، روش‌های راه‌اندازی مختلف یک موتور القایی خاص با شبیه‌سازی توسط نرم افزار متلب بررسی گردید که این روش‌ها شامل راه‌اندازی مستقیم (DOL)، راه‌اندازی با اتوترانسفورماتور، راه‌اندازی با سافت استارتر و راه‌اندازی با SVC است. تاثیر بار و شبکه قدرت در هر مدل تحلیل گردید. از طریق شبیه‌سازی می‌توان منحنی‌های دینامیکی جریان موتور و ولتاژ شین‌ها در هر کدام از روش‌های راه‌اندازی را

- based matrix converter in output stage, Alexandria Eng. J. (AEJ) 53(2014) 563–572.
- [11] Fahad Iqbal, Mohd T. Khan, Optimal placement of DG and DSTATCOM for loss reduction and voltage profile improvement, Alexandria Eng. J. (AEJ) 57 (2018) 755–765.
- [12] E.P. da Silveira, R.C. Pires, A.T.L. de Almeida, A. Jose´, J. Rezek, Direct on line starting induction motor with Thyristor Switched Capacitor based voltage regulation, in: Brazilian Power Electronics Conference, 2009, pp. 1124–1129.
- [13] R. Hadidi, I. Mazhari, A. Kazemi, Simulation of induction motor starting with SVC, in: IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, 2007, pp. 1135–1140.
- [14] P. Pourbeik, A. Bostrom, Modeling and application studies for a modern static VAr system installation, IEEE Trans. PowerDelivery (1994) 229–240.
- [15] ETAP 12.6 user guide “Control model type3” 24-p22

رزومه



فرهاد دانشی در رامهرمز متولد شده است (۱۳۵۲). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی مکانیک- طراحی جامدات در دانشگاه شهید چمران اهواز (۱۳۷۴)، کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی (۱۳۸۴) کارشناسی ارشد اقتصاد توسعه و برنامه ریزی (۱۳۸۶) سپری کرده است. هم اکنون دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز (۱۳۹۸) است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کیفیت توان، تجهیزات شبکه های توزیع برق و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر مدیر دفتر تحقیقات و استانداردهای شرکت توزیع نیروی برق اهواز می‌باشد.



علی درویش فالچی تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع دکتری برق_ قدرت در دانشگاه شهید بهشتی سپری کرده است در حال حاضر عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شادگان می‌باشد.

¹ SVC

² DOL

Help substation dynamic mode when setting up large induction motor using static power reactive compensators

Farhad Daneshi¹, Ali Darvish Falehi^{2*}

1-MSc student, Management of Research and Standards Office, Ahwaz Electricity Distribution Company, Iran, daneshifarhad@gmail.com

*2-Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Shadegan Branch, Islamic Azad University, Shadegan, Iran, falehi87@gmail.com

Abstract: Static reactive power compensators (SVCs) have been widely used to improve voltage and power factor ratios in factory and industrial substations. Therefore, these two functions are independent of each other and it is necessary to improve the power factor in order to regulate the voltage. In this paper, the new SVC startup method for induction motors is suggested. In this method, the amount of reactive power is precisely and controllable according to the load requirements. A hybrid controller includes slow suspension control and rapid voltage control that gives the SVC the ability to achieve power factor correction and creates a constant voltage characteristic during the start of the large induction motor. An ideal compensation method is recommended for both optimal voltage regulation and power factor correction. A case study on the operation of a large 1.4MW induction motor is presented with several startup methods. The comparative study is done by simulation with MATLAB software for different startup cases. Finally, the results of safe and reliable performance simulation guarantee the proposed method for effective design of operational posts.

Keywords: Compensator, static compensators reactive power, induction motor, dynamic behavior.