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

فرهاد دانشی[۱]، علی درویش فالحی[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 دریافت: ۹۸/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۲۵

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 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 راه اندازی موتور القایی بزرگ ایجاد می نماید. یک روش ایده‌آل جبرانسازی برای هر دو مورد تنظیم ولتاژ بهینه و اصلاح ضریب قدرت پیشنهاد می‌گردد. یک مطالعه موردی روی راه‌اندازی موتور القایی بزرگ۱/۴ MW با روش‌های راه‌اندازی متعدد ارائه می‌گردد. مطالعه مقایسه‌ای از طریق شبیه‌سازی با نرم افزار متلب برای موارد راه اندازی مختلف انجام می‌گیرد. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی عملکرد ایمن و مطمئن روش پیشنهادی جهت طراحی موثر پست های عملیاتی را تضمین می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: راه اندازی, جبرانساز, SVC, موتور القایی, رفتار دینامیکی

۱- مقدمه

موتورهای القایی بزرگ به طور گسترده در تمام کارخانه‌های صنعتی استفاده می شود و تولید بین المللی موتور القایی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. مزیت خودراه‌اندازی 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 نمی‌توان نادیده گرفت. هنگامی که ولتاژ بر روی موتور القایی اعمال می‌شود، مقدار زیادی جریان جاری می‌شود از ابزارهایی که به طور ناگهانی موجب شیب در ولتاژ سیستم می‌شود، 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، معمولا 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 به طور موقت اتفاق می‌افتد . در سال‌های اخیر، بسیاری از تحقیقات و مطالعات در مورد شروع موتور القایی انجام شده است[۳].

در بعضی مقالات، رفتار راه‌اندازی موتور القایی از طریق مقایسه روش-های متداول شروع می‌شود. چندین تحقیق در مورد موتورهایی که از دستگاه‌های پشتیبانی ولتاژ مانند SVC و دستگاه (STATCOM) استفاده می‌کنند، مورد بحث قرار گرفته است. این دستگاه‌ها به طور گسترده‌ای 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 راه‌انداز واکنش نشان داده، و لازم نیست برای اصلاح ضریب توان باشد[۴،۵]. توپولوژی کنترل مستقیم برای راه اندازی موتور با استفاده از تامین

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020

ولتاژ به کنترل SVC اجرا شد،SVC شامل بانک‌های خازن سوئیچ شونده شبیه آن‌چه در پست‌های صنعتی است. کنترل ساسپتانس هنگام استفاده از ولتاژ مرجع به علت اختلال کوچک، کمی تغییر می-کند. در این حالت، کنترل ساسپتانس زمان به اندازه کافی برای خازن سویچ 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 می شود. این طرح کنترل پیشنهادی برای تثبیت ولتاژ در هنگام راه اندازی موتور القایی و بهبود ضریب توان در پست در حالت پایدار مورد استفاده قرار می گیرد[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 راه اندازی نرم استفاده شد. در این مورد، شروع را می توان به چهار دسته اساسی تقسیم کرد:

شروع بار گذاری با DOL، کاهش ولتاژ الکترومکانیکی (خودکار ترانسفورماتور)، ولتاژ پایین هنگام شروع به کار (راه اندازی نرم) و راه اندازی 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 روش های مختلف راه‌اندازی در زمان شروع موتور، ولتاژ گشتاور و ولتاژ زیر شاخه ها 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 کنترل کننده ساسپتانس پیشرفته نیاز دارد. [۱۵،۱۲،۱۱]. 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 سوسپتانس 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 می‌گردد. یک مطالعه موردی روی راه‌اندازی موتور القایی بزرگ MW1.4 با روش‌های راه‌اندازی متعدد ارائه می-گردد. مطالعه مقایسه‌ای از طریق شبیه‌سازی با نرم افزار متلب برای موارد راه اندازی مختلف انجام می‌گیرد. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی 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 kV ۱۱بدون 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 MVA ۸برابر با ۲۷۷۰kVA با ضریب قدرت ۰،۷۵ پس‌فاز است و بار معادل متصل شده به ترانسفورماتور ۰،۴/۱۱ کیلوولتی با قدرت MVA ۷ برابر با ۴۲۹۵ kVA با ضریب قدرت ۰،۸۱ پس‌فاز است. معیارهای مورد مطالعه برای هر روش راه اندازی شامل سه مورد اصلی خواهد بود:

۱- راه‌اندازی موتور با افت ولتاژ ترمینال مناسب

۲- راه‌اندازی موتور در زمان راه اندازی 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 پست های فشار ضعیف و فشار متوسط و ۱۰٪ به عنوان محدوده بحرانی در نظر گرفته می‌شود.)

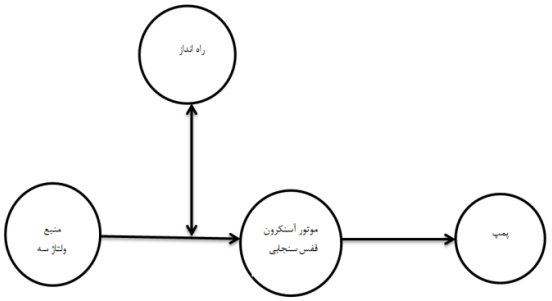
راه‌اندازی مستقیم موتور القایی (DOL)، ساده ترین، رایج‌ترین و کم هزینه‌ترین روش راه‌اندازی موتورهای القایی قفس سنجابی است. راه اندازی مستقیم گشتاور شتاب‌گیری بالایی ایجاد کرده و زمان شتاب-گیری را کاهش می دهد. روش DOL در محیط سیمولینک متلب مدل می‌گردد.

۲-۱- مدل سیمولینکی

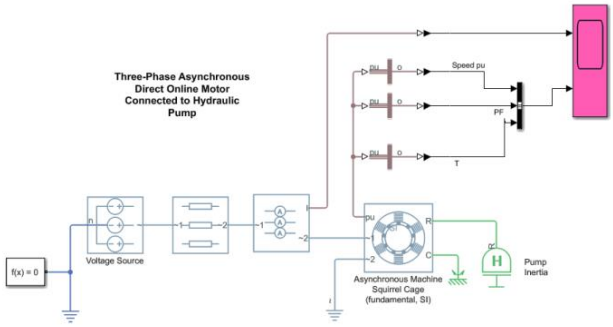
می‌دانیم، وقتی که ولتاژ نامی ترمینال به یک‌باره به یک موتور القایی که در حالت سکون است، اعمال گردد. یک گشتاور گذرای نوسانی ظاهر می‌گردد. بنابراین، این واقعیت به طور غیر منتظره توسط بسیاری از کاربران صنعتی در نظر گرفته نشده است. گشتاور گذرای نوسانی بیش از حد زمانی رخ می‌دهد که ولتاژ منبع تغذیه به طور ناگهانی برای راه اندازی 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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

سیمولینکی با راه اندازی DOL[۲] برای مشاهده این پدیده انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از این مدل می‌تواند شکل دقیقی برای گشتاور گذرا در روش‌های راه اندازی دیگر ارائه دهد. مقادیر گشتاور گذرا بایستی زمانی که در محدوده مجاز قرار دارند، بررسی گردد. شکل ۱ دیاگرام تک خطی، شکل۲ طرح شبیه سازی و شکل های ۳ و ۴ رفتار دینامیکی موتور در طول کل دوره راه‌اندازی را نشان می‌دهند.

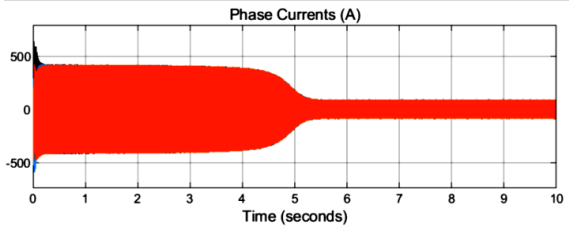


شکل۱: مدل تک خطی راه اندازی موتور

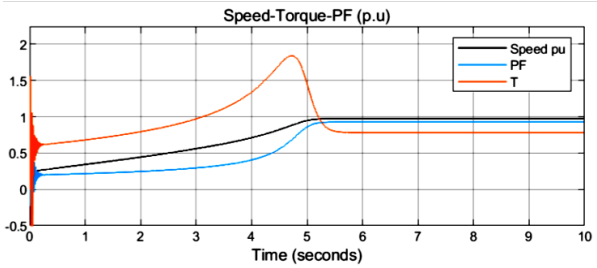


شکل۲: مدل دینامیکی موتور در فضای سیمولینک متلب

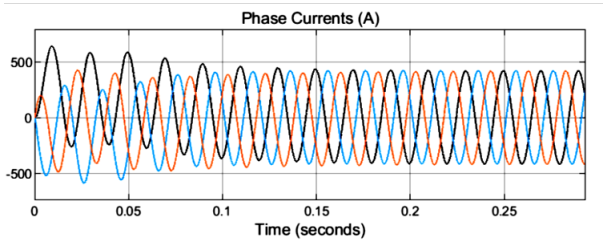
شکل‌های ۵ و ۶ نتایج شبیه‌سازی حالت‌های گذرای موتور در آغاز دوره راه‌اندازی و رفتار گذرای جریان، گشتاور و ضریب قدرت را برای موتور نشان می‌دهند.



شکل۳: جریان راه‌اندازی موتور با روش DOL



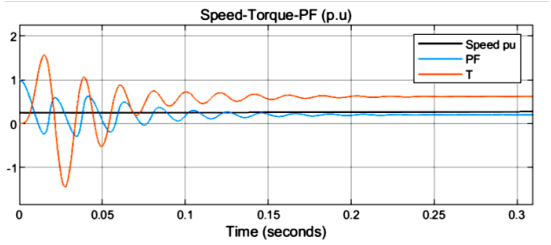
شکل۴: رفتار دینامیکی موتور با روش DOL



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

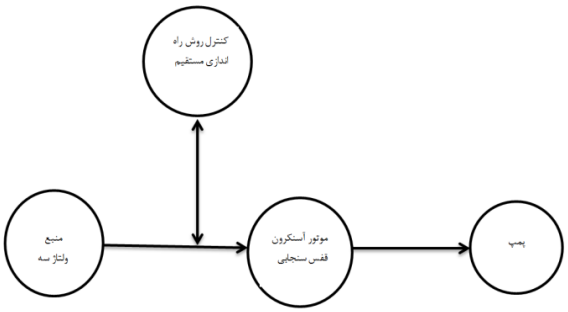
باتوجه به شکل‌های ۴ و ۵ و بعد از تغییر شرایط منبع تغذیه طی زمان طولانی، گشتاور گذرا برای موتور القایی به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد:

نوسانات گذرای گشتاور مربوط به این موتور القایی هنگامی رخ می‌دهد که ولتاژ نامی به طور مستقیم به ترمینال‌های موتور اعمال می‌گردد. دامنه و طول مدت این نوسانات گذرای گشتاور تحت تاثیر شیفت فاز منبع تغذیه قرار نمی‌گیرند. مقدار گشتاورهای گذرا معمولا یا بین ۴ تا ۶ پریونیت بوده یا بیش از مقدار گشتاور نامی بسته به جریان راه‌اندازی موتور می‌باشد. فرکانس نوسان گشتاور معادل با فرکانس منبع تغذیه است. گشتاور گذرا بیان‌گر جنبه‌های مختلف پارامترهای ماشین از جمله اینرسی روتور موتور القایی و بار است.



شکل۶: رفتار گذرای موتور در روش DOL

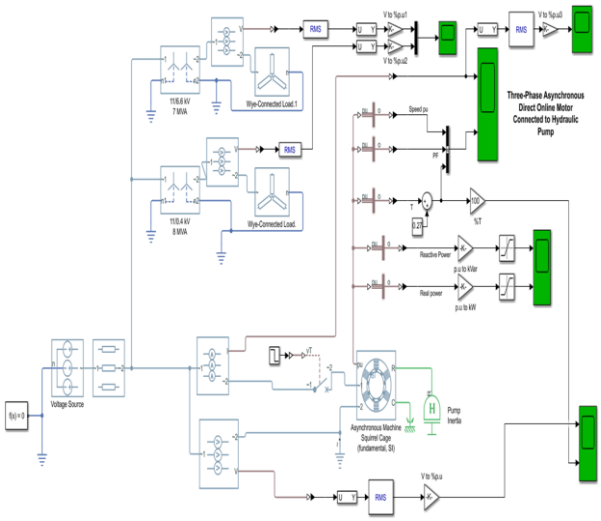
دیاگرام تک خطی در شکل ۷، شبیه‌سازی دینامیکی موتور القایی ۱/۴ مگاواتی در طول شتاب‌گیری آن در محیط سیمولینک متلب مطابق شکل۸ انجام گرفته است. نتایج این شبیه‌سازی در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شداند.



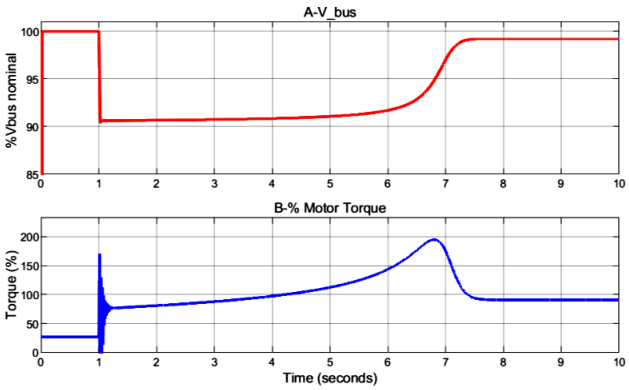
شکل۷: مدل تک خطی راه اندازی موتوربا روش DOL

بعد از اجرای برنامه، شتاب‌گیری موتور بدون ادوات راه‌اندازی آغاز می شود. افت ولتاژ نهایی به دست آمده در شبیه‌سازی نشان می‌دهد که همه باس‌های پایین دست شینه 11kV تحت تاثیر این افت ولتاژ مطابق شکل ۱۱ قرار می‌گیرند.

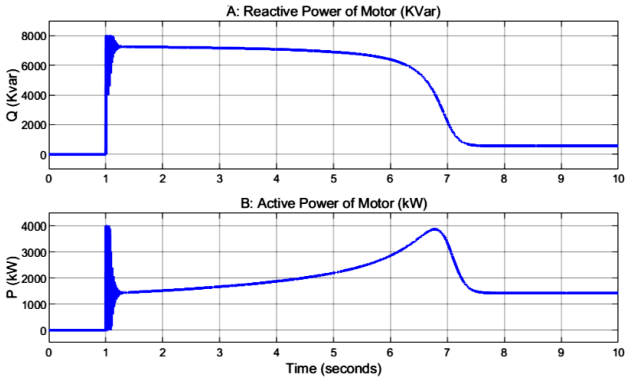
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]



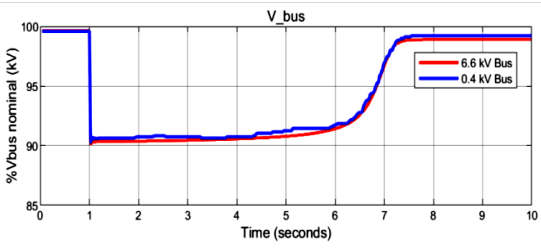
شکل۸: شبیه‌سازی رفتار دینامیکی موتور القایی با روش DOL به همراه فیدرهای 6.6kV و 0.4kV



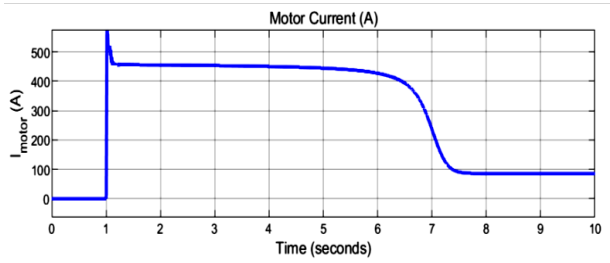
شکل۹: A: ولتاژ ترمینال ۱۱ کیلوولت با راه‌اندازی مستقیم (DOL)
B: گشتاور موتور با روش راه‌اندازی DOL



شکل۱۰: A: توان راکتیو مصرفی موتور با راه‌اندازی DOL B: توان اکتیو مصرفی موتور با راه‌اندازی DOL



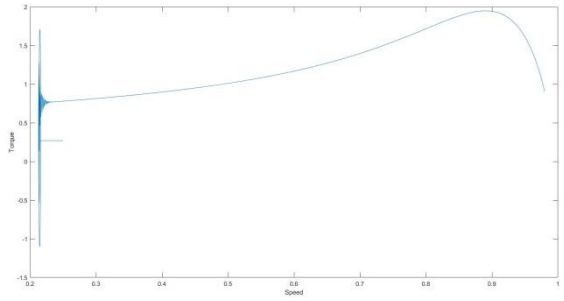
شکل۱۱: ولتاژ sag ایجاد شده در سوییچ‌گیرهای 6.6kV و 0.4 kV تحت راه‌اندازی DOL



شکل۱۲: 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. شکل۹ ولتاژ ترمینال موتور و مشخصات گشتاور-سرعت را نشان می‌دهد. به جای رابطه لغزش-گشتاور، رابطه گشتاور – زمان تصویر روشنی از زمان راه-اندازی موتور ارائه می‌دهد که حدود ۶ ثانیه است. ولتاژ ترمینال موتور در طول دوره راه‌اندازی به اندازه ۹۱٪ افت پیدا می‌کند که کمتر از حد مجاز است. در شکل۱۰ 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. شکل۱۲ جریان راه‌اندازی موتور در طی DOL را نشان می‌دهد و مقدار آن تقریبا پنج برابر مقدار جریان نامی است.

در شکل ۱۳ منحنی گشتاور سرعت در راه اندازی 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.



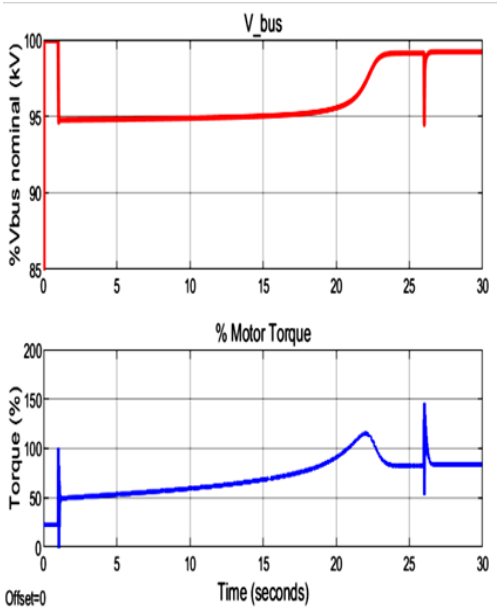
شکل۱۳: منحنی گشتاور-سرعت در روش DOL

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

۲-۲- راه‌اندازی با اتوترانسفورماتور

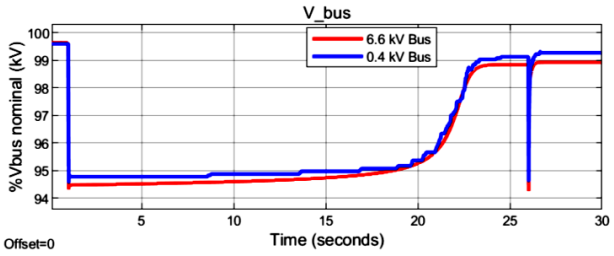
این روش به عنوان یک روش راه اندازی ولتاژ کاهش یافته با به کارگیری تجهیزات الکترومکانیکی استفاده می‌گردد که در آن ترمینال-های موتور به سمت فشار ضعیف اتوترانس متصل می‌گردد. رایج‌ترین تپ‌هایی که به کار می‌روند، ۸۰٪ ، ۶۵٪ و ۷۵٪ هستند. در این مورد، ۷۵٪ ولتاژ نامی برای ولتاژ راه‌اندازی موتور در نظر گرفته می‌شود و جریان اولیه به ۷۰٪ مقدار جریان روتور قفل موتور کاهش می‌یابد. موتور با این جریان ولتاژ کاهش یافته راه‌اندازی 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 شکل۱۴ نشان داده شده است. راه‌اندازی دینامیکی موتور در شکل۱۵ نشان داده می‌شود. از آنجا که گشتاور تولیدی موتور با توان دو ولتاژ اعمالی تغییر می‌نماید، لذا گشتاور راه‌اندازی از ۸۰٪ تا ۴۵٪ گشتاور نامی در راه‌اندازی با اتوترانس کاهش می‌یابد.

گشتاور موتور بایستی متناسب با گشتاور بار کامل آن در تمام نقاط منحنی مطابق شکل۱۵ باشد. زمان شتاب‌گیری برای اطمینان از این‌که 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.

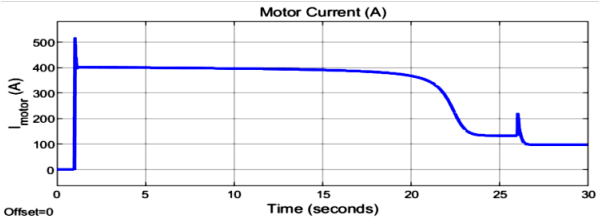


شکل ۱۴و ۱۵ : ولتاژ باس11kV و گشتاور موتور در روش راه‌اندازی با اتوترانسفورماتور

شکل ۱۶ یکی از شین‌های سوئیچ‌گیر را نشان می‌دهد که اولین نگرانی در مطالعه مورد نظر به حساب می‌آید. گشتاور منتجه به خوبی ولتاژهای باس نیست. شکل۱۴ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار گشتاور در راه‌اندازی به‌طور قابل توجهی از ۲۰۰٪ به زیر ۱۵۰٪ کاهش می‌یابد. در حقیقت، این نتیجه مورد انتظار بود. شکل۱۴ آفست بسیار کم بین گشتاور موتور و گشتاور بار بین لحظات ۱۰ تا ۲۰ ثانیه را نشان می-دهد. دوره راه‌اندازی تا ۲۲ ثانیه افزایش می‌یابد. در نتیجه سوئیچ‌گیر دوردست در اثر راه‌اندازی مستقیم موتور دچار ولتاژ sag طولانی مدت خواهد شد. جریان راه‌اندازی در شکل۱۶ برابر با ۴۰۰٪ است. این امر باعث می‌گردد که وضعیت حرارتی موتور در هنگام راه‌اندازی به مقدار ظرفیت حرارتی آن افزایش یابد. در مرحله بعدی اتو ترانس حذف شده و جای خود را به سافت استارتر می‌دهد.



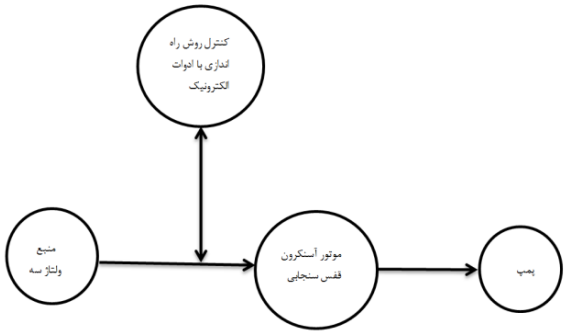
شکل۱۶: ولتاژ باس‌های 6.6kV و 0.4kV در راه‌اندازی با اتوترانسفورماتور



شکل۱۷: جریان موتور با روش راه‌اندازی اتوترانسفورماتور

۲-۳- روش راه اندازی با سافت استارتر

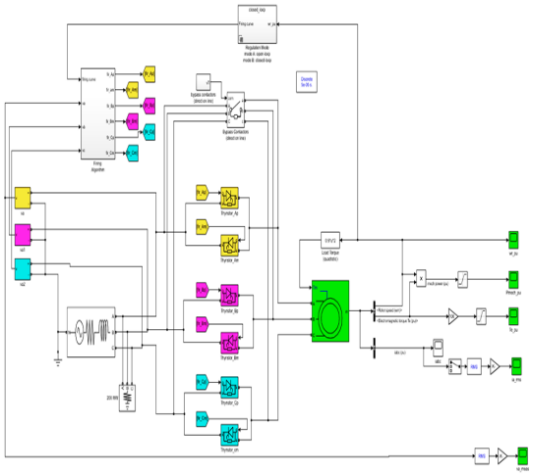
ماژول سافت استارتر از نیمه هادی‌های SCR استفاده می‌کند. با کنترل زاویه آتش SCR، ولتاژ تولیدی سافت استارتر می‌تواند در طی راه‌اندازی موتور با محدود نمودن عبور توان کنترل گردد. سپس شیب ولتاژ اعمالی تا زمانی که به محدودیت ولتاژی برسد ادامه می‌یابد و بعد از آن جریان شتاب دهنده موتور ثابت می‌ماند. در روش 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 موتوربا روش ادوات الکترونیک قدرت

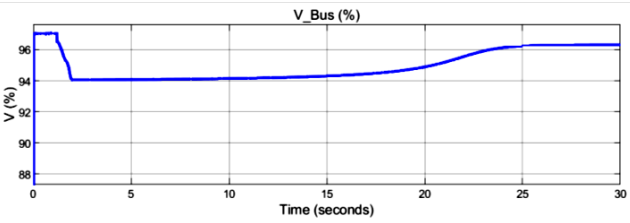
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

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.

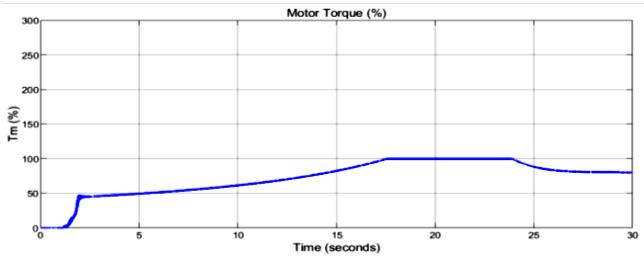


شکل۱۹: مدار سافت استارتر با کلیدهای SCR

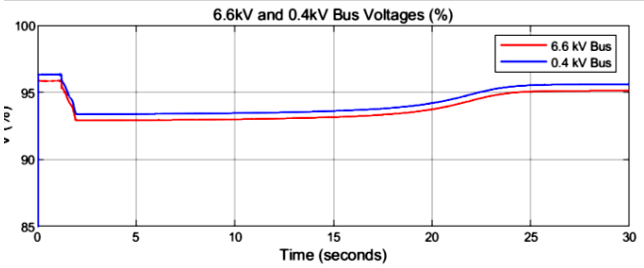
منحنی‌های دینامیکی ولتاژ باس در سیمولینک متلب نشان از بهبودی ولتاژ باس‌های فشار متوسط و فشار ضعیف دارد که در شکل-های ۲۰ و ۲۲ نشان داده شده‌اند. نتایج دیگری چون گشتاور و سرعت، عملکرد مشابهی با روش قبلی دارند. شکل ۲۱ آفست بسیار کم بین گشتاور موتور و گشتاور بار بین زمان‌های ۱۰ تا ۲۰ ثانیه را نشان می-دهد. 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 استارت نسبت به اتوترانس بیشتر است اما جریان راه‌اندازی مقدار کمتری دارد. بنابراین، انرژی در طول دوره راه‌اندازی تقریبا یکسان است و همیشه یک زمان از پیش تعیین شده در سافت استارت برای زمان شتاب‌گیری وجود دارد.



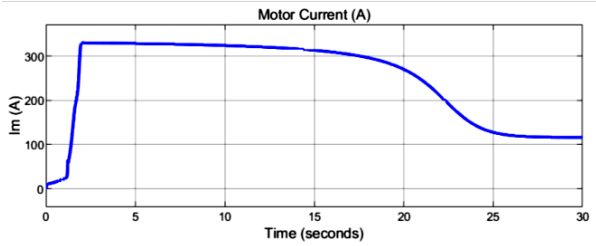
شکل۲۰: ولتاژ باس 11kV تحت راه‌اندازی با سافت استارتر



شکل۲۱: گشتاور موتور در حین راه‌اندازی با سافت استارتر



شکل۲۲: ولتاژ باس های 6.6kV و 0.4kV در حین راه‌اندازی با سافت استارتر



شکل۲۳ : جریان موتور در طول راه اندازی با سافت استارتر

۲-۴- راه اندازی با استفاده از SVC پیشنهادی

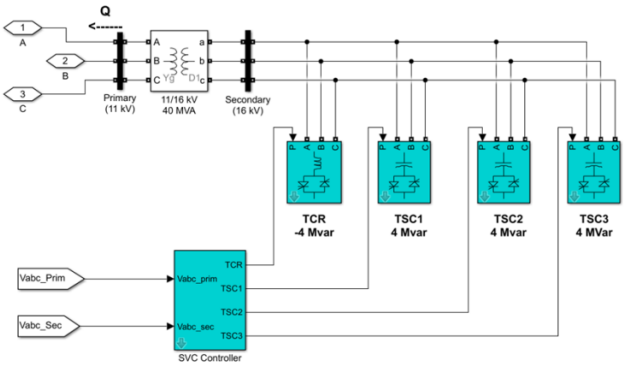
SVC یکی از ادوات سیستم‌های انتقال AC انعطاف پـذیر (FACTS) می‌باشد که با به‌کارگیری الکترونیک قدرت توان عبوری در شبکه‌هـای قدرت را کنترل کرده و به طور موفقیت آمیزی در کاربردهای صـنعتی پیاده‌سازی شده است. SVC ولتاژ پایانه‌های خود را بـا کنتـرل مقـدار توان راکتیو تزریقی به شبکه یا جذب آن از شبکه قدرت با تنظیم ولتاژ مرجع یا سوسپتانس مرجع تنظیم می‌کند. هنگامی که ولتـاژ سیسـتم پایین است، SVC توان راکتیو تولید می‌کند (مُد خازنی) و وقتـی کـه ولتاژ سیستم بالاست، توان راکتیو از شبکه جذب می‌نماید (مُد سلفی). تغییر توان راکتیو با کلیدزنی بانـک‌هـای خـازنی و کنتـرل بانـک‌هـای سلفی انجام می‌گیرد. سـاختار پیشـنهادی SVC شـامل خـازن کلیـد شونده تریستوری (TSC) به عنوان منبع خازنی و راکتور کنترل شونده تریستوری (TCR) به عنوان منبع سلفی است. TCR بـه طـور خطـی برای تولید اندوکتانس یا برای صاف نمودن ظرفیت خازنی خروجـی بـا به کارگیری کنترل فاز کنترل می‌گردد. در این مطالعـه یـک TCR بـا نوع TSC برای غلبه بر ولتاژ sag در طول راه‌اندازی موتور به کار مـی-رود و در نتیجه با به‌کارگیری SVC به جای بانک خازنی ثابت ضـریب قدرت بهبود می‌یابد. جبران‌ساز TSC-TCR با کنترلر SVC در شـکل ۲۴ نشان داده شده است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

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 تبادل توان راکتیو انجام گیرد.

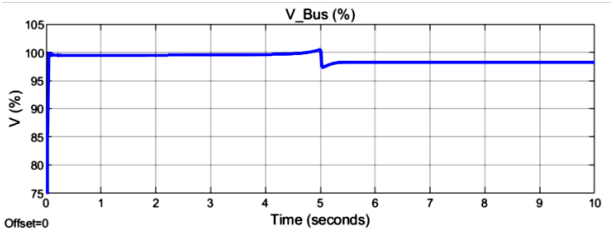
۲-۵- راه اندازی موتور با SVC پیشنهادی

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 تقریبا در همه باس‌ها مطابق شکل های ۲۵ و ۲۷ به اندازه ۱٪ افت می کند. منحنی های مشخصه گشتاور- سرعت در شکل ۲۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افت ولتاژ ترمینال‌ها در طول راه‌اندازی DOL بسیار کم است.



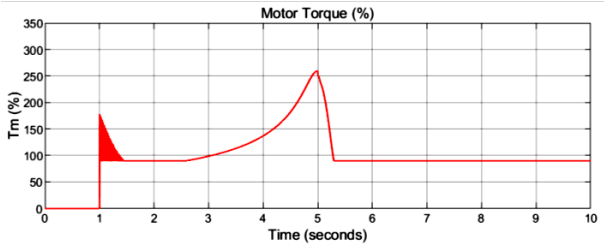
شکل۲۴: بلوک دیاگرام ساختار TSC-TCR کنترل شده با SVC

SVC در به حداقل رساندن بازه زمانی راه‌اندازی نسبت به روش-های 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.

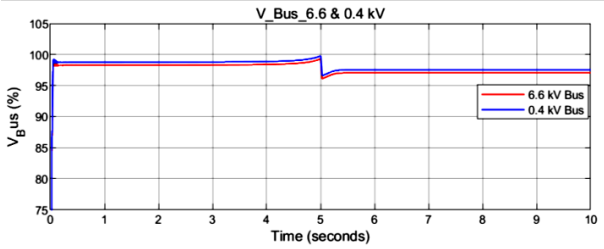


شکل۲۵: ولتاژ باس 11kV با روش راه‌اندازی از طریق SVC

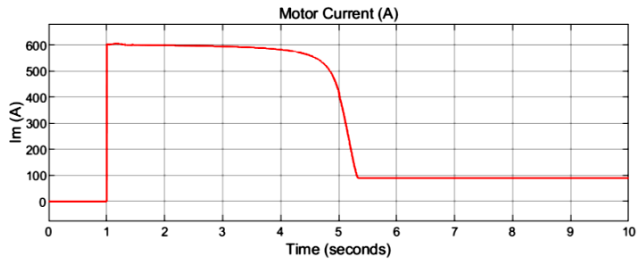
شکل۲۶ گشتاور شتاب‌گیری را در دوره بحرانی یکسان با آفست خوبی نشان می‌دهد. دوره راه‌اندازی کمتر از ۴/۶ ثانیه است که در شکل ۲۸ نشان داده شده است در حالی که جریان راه‌اندازی به طور جزئی کمی بیشتر از جریان راه‌اندازی با روش DOL است.



شکل۲۶: گشتاور موتور در طول راه‌اندازی با روش SVC



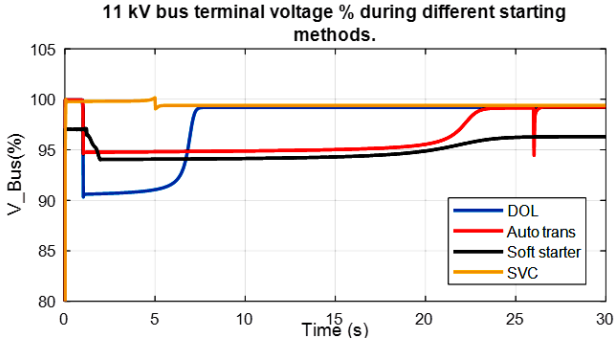
شکل۲۷: ولتاژ باس‌های 6.6kV و 0.4kV با روش راه‌اندازی SVC



شکل۲۸: جریان موتور در طی راه‌اندازی با SVC

۳- نتایج مقایسه‌ای

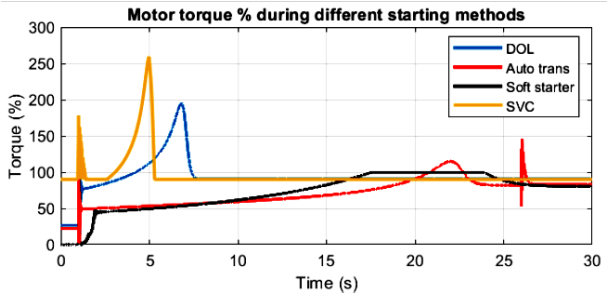
در این بخش، مقایسه گرافیکی بین روش‌های راه‌اندازی موتور القایی انجام شده است که در آن شکل ۲۹ ولتاژ sag ناشی از راه‌اندازی موتور در شین 11kV تحت سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۳۰ مشخصه‌های گشتاور موتور با همین معیارها را نشان می‌دهد و در نهایت شکل۳۱رفتار جریان راه‌اندازی تحت روش‌های مختلف راه‌اندازی موتور را نشان می‌دهد.



شکل۲۹: ولتاژ باس 11kV تحت روش‌های راه‌اندازی مختلف

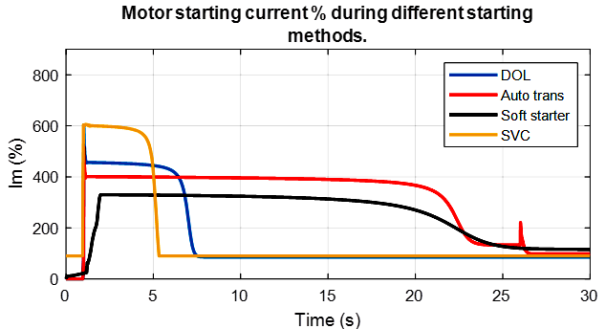
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020



شکل ۳۰: گشتاور موتور تحت روش های راه‌اندازی مختلف

شکل ۲۹ نشان می‌دهد که ولتاژ sag تقریبا 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 kV ۱۱ با افت ولتاژ ۱٪ دارد. دوره شتاب‌گیری با روش DOL کوتاه‌تر شده و دقیقا 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 تقریبا 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 تقریبا نزدیک به مشخصه SVC دارد. دو روش دیگر تقریبا با یکدیگر مشابهند دلیل این امر دسته بندی یکسان آنها در کاهش ولتاژ راه اندازی 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 ۴۰۰٪ شروع می‌شود و در پایان دوره راه‌اندازی به ۳۰۰٪ 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 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 روش های راه‌اندازی دیگر دارد. راه‌اندازی موتور با SVC گشتاور شتاب‌گیری را افزایش می دهد و زمان راه اندازی کوتاه‌تری ایجاد می نماید. 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 راه اندازی 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: acomputer 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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020

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. Bostro¨ m, 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)، کارشناسی‌ارشد 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 فالحی 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

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020

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

Farhad Daneshi [1], 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.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-04-12]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.4.5.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 4- Winter 2020