روش تطبیقی جدید برای جابجایی فیدر تغذیه کننده موتور

مهدی داورپناه[1] کاوه نیایش [2]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران
m.davarpanah@ut.ac.ir
۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران
kniayesh@ut.ac.ir

چکیده: موتورهای القایی و سنکرون پس از جدا شدن از شبکه برای مدت کوتاهی به ژنراتور تبدیل می شوند. در این حالت اختلاف ولتاژ و فرکانس بین ترمینال موتور و سیستم به تدریج افزایش می یابد. اتصال مجدد موتور به شبکه در حالت عدم برقراری شرایط سنکرونایزینگ، ممکن است باعث آسیب مکانیکی به موتور شود. برای حل این مشکل روشهای مختلفی در مراجع پیشنهاد شده است که بر مبنای انتقال باس تغذیه کننده موتور هستند. دراین مقاله طرحهای مختلفی از قبیل انتقال موازی، جابجایی سریع، جابجایی در زمان طولانی، جابجایی در ولتاژ کم موتور و جابجایی سنکرون با شبیه سازی یک شبکه صنعتی مورد بررسی قرار گرفته است. ضمنا، روش جابجایی سنکرون بکار رفته در یک رله صنعتی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. سپس الگوریتم جدیدی برای جابجایی فیدر تغذیه کننده شینه پیشنهاد شده است که با اجرای آن تنش مکانیکی و حرارتی وارد بر موتور حداقل می شود.

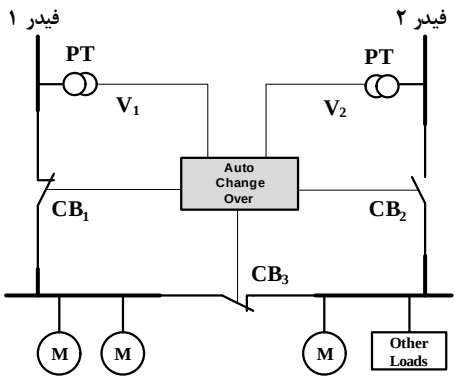
کلمات کلیدی: قطع تغذیه موتور، جابجایی سریع تغذیه باس، جابجایی سنکرون تغذیه باس، حداقل مربعات خطا، الگوریتم فوریه، پیش بینی شکل موج

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۹/۰۸/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۶/۱۲
نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی داورپناه
نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – تهران – میدان انقلاب- خیابان کارگر شمالی– پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران – دانشکده برق و کامپیوتر

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.1- Spring & Summer 2012
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]

۱- مقدمه

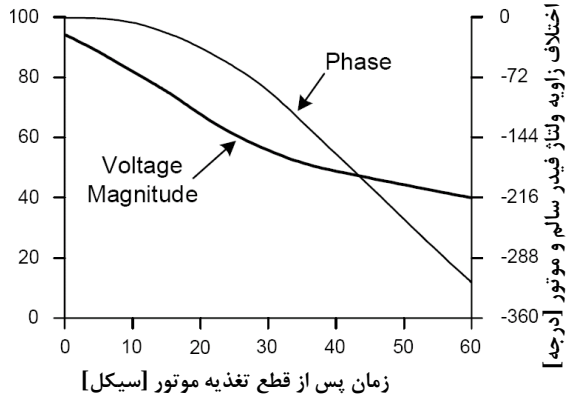
تداوم تغذیه برخی از بارها به ویژه موتورهای مورد استفاده در صنایعی نظیر پتروشیمی، پالایشگاه، سازندگان قطعات نیمه هادی، نیروگاه های هسته‌ای و بخاری، کارخانجات تولید شیشه، کاغذ و پارچه به اندازه‌ای اهمیت دارد که معمولا باس بار متصل به این نوع بارها از فیدرهای مختلفی تغذیه می شود [۱]. در صورت بی برقی یک فیدر لازم است که تغذیه باس در کمترین زمان ممکن به فیدر دیگری انتقال یابد. انتقال تغذیه باس از یک فیدر به فیدر دیگر، به طرح انتقال باس[۱] معروف است و به رله‌ای که بطور خودکار چنین عملی را انجام می دهد، رله Auto Change over یا Bus Transfer گفته می شود. انتقال باس می تواند بعد از رخداد خطا در فیدر و یا به دلیل بی برق شدن فیدر تغذیه کننده شینه انجام شود. در شکل (۱) نمونه متداولی از شینه بندی مورد استفاده در شبکه‌های صنعتی نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، تغذیه بارهای متصل به باس بار از طریق سه کلید می تواند تغییر کند که در بهره برداری عادی معمولا دو کلید بسته و یکی باز می باشد و لذا به طرح دو از سه معروف است. به عنوان نمونه فرض می شود کلیدهای ۱ و ۳ در حالت عادی بسته می باشند. در صورت تشخیص بی برقی در فیدر ۱، می‌توان به منظور تداوم تغذیه بارهای موتوری نسبت به باز کردن کلید CB_1 و بستن کلید CB_2 اقدام کرد. لیکن پیاده سازی این طرح کنترلی ساده ممکن است باعث آسیب به موتور شود که در این مقاله به بررسی آن پرداخته خواهد شد.



شکل (۱): طرح دو از سه در یک شینه بندی متداول صنعتی

۲- رفتار موتور پس از قطع تغذیه

پس از قطع تغذیه موتور به دلیل اینرسی مجموعه روتور و بار مکانیکی و همچنین شار موجود در فاصله هوایی (به دلیل برقراری جریان میرا شونده در مدار بسته روتور) ولتاژی در ترمینال موتور ظاهر می شود که دامنه و فرکانس آن به تدریج کاهش می یابد. ثابت زمانی کاهش دامنه ولتاژ و فرکانس به اینرسی مجموعه گردان موتور و بار، ظرفیت نامی و مقدار بار متصل به موتور، تعداد موتورهای القایی و سنکرون و سایر بارهای متصل به باس مشترک با موتور بستگی دارد [۲]. [۳] به عنوان نمونه در شکل (۲) دامنه و زاویه ولتاژ ترمینال موتور سنکرون با ظرفیت نامی ۶۰۰۰ اسب بخار نشان داده شده است که قبل از بی‌برقی به یک فن با اینرسی بالا متصل بوده و در ۲۵٪ بار نامی کار می‌کرده است[۴]. در این حالت پس از ۴۲ سیکل (۷۰۰ میلی ثانیه) دامنه ولتاژ به نصف مقدار نامی می‌رسد. ضمنا به دلیل افت فرکانس، اختلاف زاویه بین ولتاژ ترمینال موتور و فیدر سالم، از حدود صفر درجه به تدریج زیاد شده تا به ۳۶۰ درجه می رسد[۵]. به دلیل اینرسی بالای بار مکانیکی و کاهش آهسته سرعت و فرکانس ترمینال موتور، اختلاف زاویه بین ولتاژ موتور و فیدر سالم که در اتصال صحیح موتور به فیدر سالم اهمیت دارد، به آرامی افزایش می یابد. مطابق شکل (۲) در موتور مورد بررسی، بیش از یک ثانیه طول می کشد که اختلاف زاویه به صفر (۳۶۰ درجه) برسد.



شکل (۲): ولتاژ ترمینال موتور سنکرون متصل به بار با اینرسی بالا پس از قطع تغذیه [۴]

در این مقاله یک موتور القایی با ولتاژ نامی ۱۳,۸ کیلوولت و ظرفیت ۱,۵ مگاوات با نرم افزار PSCAD شبیه سازی شده است که تحت بار نامی کار می‌کند. گشتاور بار مکانیکی متصل به آن بر حسب پریونیت (T_L) مطابق رابطه (۱) در نظر گرفته شده است.

$$T_L = 0.85 \times \omega_m^2 + 0.05 \qquad (۱)$$

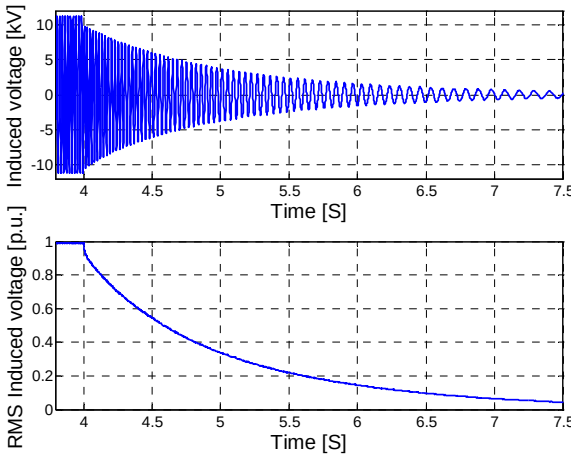
ω_m سرعت زاویه ای روتور بر حسب پریونیت (با مقدار مبنای $2\pi \times 50 = 314.16\ rad/s$) می باشد.

در شکل (۳) شکل موج و مقدار موثر ولتاژ فاز A پس از جدا شدن موتور القایی مورد بررسی در این مقاله از شبکه برق، نشان داده شده است.

۳- انواع طرح جابجایی فیدر تغذیه باس

در صورتی که به دلیل وقوع خطا در فیدر اول متصل به باس، بی برق شدن آن (ناشی از باز شدن کلید در شبکه بالا دستی) یا انجام مانور در شبکه نیاز به تغییر فیدر تغذیه کننده باس باشد، می توان با توجه به شرایط موجود یکی از طرح های زیر را مورد استفاده قرار داد. به عنوان شرایط اولیه حالتی مشابه شکل (۱) در نظر گرفته می شود که کلیدهای ۱ و ۳ بسته بوده و کلید ۲ باز است و لذا هدف این است که پس از انتقال باس، کلید ۲و۳ بسته بوده و کلید ۱ باز باشد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]



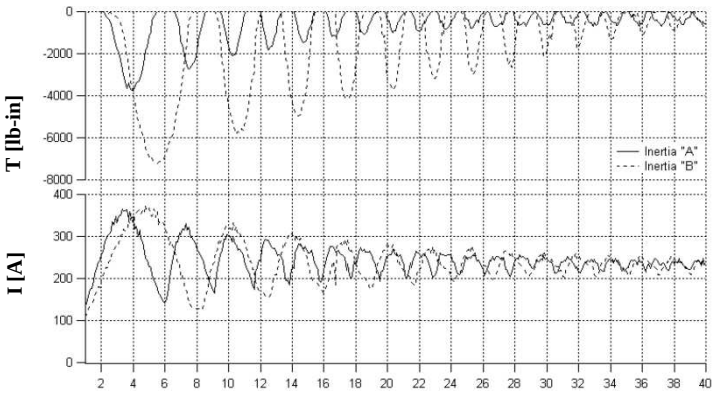
شکل (۳): شکل موج و مقدار موثر ولتاژ القایی در ترمینال موتور مورد مطالعه پس از قطع ولتاژ تحریک

آزمایشات عملی انجام شده در مراجع [۶] و [۷] نشان می دهد که حداکثر مقدار گشتاور مولفه منفی که بعد از وصل مجدد تغذیه در بدترین زمان بوجود می آید در دو نوع موتور متفاوت، معادل ۵,۵ و ۹ برابر گشتاور نامی است. مطابق مرجع [۸]، آزمایش وصل مجدد تغذیه بر روی یک موتور ۴۰۰ ولت با توان ۱۰ اسب بخار که در بار نامی با اینرسی بالا کار می کند، نشان می دهد که گشتاور وارد بر شفت روتور در بدترین حالت معادل با حدود ۲۰ برابر مقدار نامی است. بدیهی است که حتی مقادیر کمتر از آن نیز ممکن است باعث آسیب به موتور و به ویژه کوپلینگ موتور و بار مکانیکی شود [۸]. ضمنا فرورفتگی ولتاژ[۲] حاصل از جریان هجومی موتور نیز قابل توجه بوده که آثار سوئی بر سایر تجهیزات متصل به باس دارد. به عنوان نمونه ممکن است باعث قطع کنتاکتورها و بارهای متصل به آن شود [۹] و [۱۰].

نتیجه مطالعه آزمایشگاهی انجام شده بر روی یک موتور القایی ۴۶۰ ولت با توان نامی ۱۰ اسب بخار در شکل (۴) نشان داده شده است که در آن دو مقدار اینرسی بار حالت A (معادل نصف اینرسی روتور) و اینرسی بار حالت B (معادل دو برابر اینرسی روتور)، معرف بارهای با اینرسی کم و زیاد هستند. در این آزمایش در لحظه صفر کلید CB1 باز شده (مطابق شکل ۱) و باس بار متصل به موتور از شبکه الکتریکی جدا می شود. سپس در زمانهای مختلف بعد از آن، با کمک کلید فرمان پذیر الکترونیکی CB2، تغذیه مجدد موتور انجام می شود. در هر بار انجام این آزمایش حداکثر گشتاور منفی مکانیکی وارد بر شفت موتور و همچنین پیک جریان هجومی موتور اندازه گیری می شود. لازم به ذکر است که مقدار گشتاور نامی موتور برابر 365 lb-in می باشد[۸]. مطابق شکل (۴) در برخی زمانها گشتاور منفی برابر صفر بوده که متناظر با لحظاتی است که اختلاف فاز بین ولتاژ منبع و ولتاژ ترمینال موتور ناچیز باشد.

۳-۱- عملکرد موازی فیدرها قبل از انتقال تغذیه باس

در این حالت کلید CB_2 نیز بسته شده و لذا باس بار موقتا به هر دو فیدر متصل می باشد و سپس کلید CB_1 باز می‌شود. به این ترتیب باس بار به هنگام انتقال تغذیه بی برق نمی شود. از این طرح زمانی می توان استفاده کرد که شرایط زیر برقرار باشد.



شکل (۴): حداکثر گشتاور منفی و جریان راه اندازی در آزمایش موتور با دو بار مکانیکی مختلف در زمانهای مختلف وصل مجدد تغذیه

الف. قبل از وصل CB_2 اتصال کوتاهی در فیدر ۱ وجود نداشته باشد. در واقع ممکن است افت ولتاژ V_1 به دلیل اتصال کوتاه در فیدر ۱ باشد که در صورت وصل CB_2 جریان خطا از فیدر ۲ نیز عبور کرده و ممکن است منجر به عملکرد رله های آن و تریپ کلید CB_2 شود.

ب. قبل از وصل CB_2 بایستی شرایط سنکرونایزینگ (اختلاف دامنه و زاویه کم بین ولتاژ V_2 و V_1) برقرار باشد که برای بررسی آن نیاز به استفاده از رله سنکرونایزینگ یا سنکروچک[۳] می‌باشد[۱۱].

ج. موازی نمودن فیدرها باعث افزایش سطح اتصال کوتاه می‌شود، و در صورتی که از جریان اتصال کوتاه نامی تجهیزات متصل به باس بار بیشتر باشد، ممکن است جریان خطا به تجهیزات صدمه جدی وارد نماید.

بنابراین نمی توان همواره از طرح اتصال موازی فیدرها به منظور انتقال تغذیه باس بار استفاده نموده و طرح‌های انتقال ترتیبی[۴] در صنعت متداول‌تر می باشند.

۳-۲- جابجایی سریع تغذیه باس[۵]

در این روش پس از باز شدن کلید قدرت CB_1 و قطع ولتاژ تغذیه باس، از طریق کنتاکت کمکی کلید CB_1 فرمان وصل به کلید CB_2 ارسال می شود. بنابراین مشکلات موازی شدن دو فیدر وجود نداشته و لزومی به استفاده از رله سنکرونایزینگ نمی‌باشد. از طرف دیگر به دلیل انتقال سریع تغذیه باس، کاهش سرعت موتور در این حالت خیلی کم بوده و احتمالا تداوم کارکرد موتور برقرار می باشد.

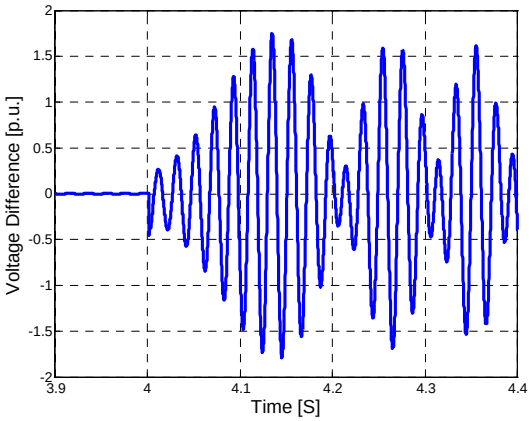
زمان قطع و وصل کلیدهای قدرت فشار متوسط به صورت نمونه به ترتیب برابر ۴۵ و ۶۵ میلی ثانیه می باشد[۱۲]. لذا چنانچه انتقال باس پس از رخداد خطا در فیدر ۱ مورد نیاز باشد، در این روش که سریع‌ترین طرح صنعتی انتقال ترتیبی تغذیه باس است، موتور لااقل در زمانی حدود ۱۱۰ میلی ثانیه پس از رخداد خطا، بی برق بوده که البته به دلیل تاخیر عمدی و ذاتی رله های حفاظتی و رله های واسطه ممکن است که این زمان تا حدود ۲۰۰ میلی ثانیه به‌طول انجامد.

در شکل (۵) اختلاف ولتاژ فیدر سالم و ولتاژ القایی در ترمینال موتور (ولتاژ دو سر کلید CB2) مورد بررسی نشان داده شده است.

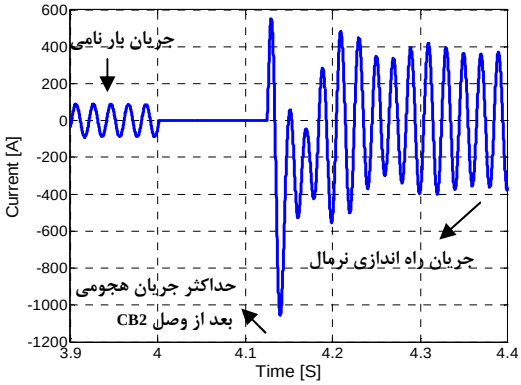
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.1- Spring & Summer 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]

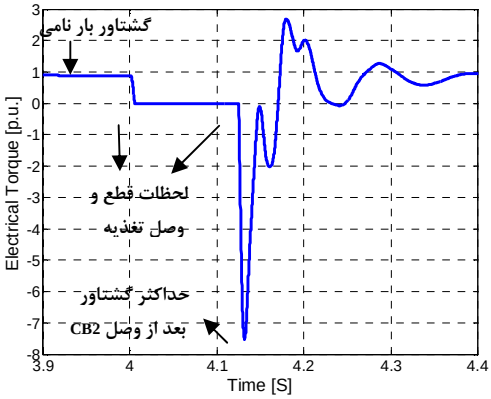
مطابق این شکل بعد از گذشت ۱۲۵ میلی ثانیه از قطع ولتاژ تغذیه موتور، اختلاف ولتاژ دو سر کلید CB2 به حدود ۱,۷۳ برابر مقدار نامی می‌رسد. مطابق شکل (۶) در صورت وصل کلید CB2 در این زمان، پیک جریان هجومی عبوری از موتور حدود ۲,۵ برابر جریان راه اندازی حالت عادی می باشد که علاوه بر تاثیر سوء ناشی از نیروهای الکترودینامیکی بر موتور، مطابق شکل (۷) حداکثر گشتاور لحظه‌ای در موتور مورد مطالعه ناشی از وصل مجدد تغذیه موتور در شرایط غیر سنکرون مذکور حدود ۷,۵ برابر مقدار نامی است که می‌تواند باعث صدمه مکانیکی به موتور و بار متصل به آن گردد.



شکل (۵): ولتاژ دو سر کلید CB2 پس از قطع کلید CB1



شکل (۶): جریان موتور هنگام وصل کلید CB2 در زمان ۴,۱۲۵ ثانیه



شکل (۷): گشتاور الکتریکی موتور در حالت نرمال، قطع تغذیه در ۴ ثانیه و وصل کلید CB2 در زمان ۴,۱۲۵ ثانیه

آنچه که باعث تاکید برخی از سازندگان موتور در عدم استفاده از روش جابجایی سریع تغذیه باس می باشد، گشتاور مولفه منفی بزرگی است که به دلیل اختلاف فاز زیاد بین ولتاژ منبع و ترمینال موتور ایجاد می شود [۱۳].

۳-۳- انتقال تغذیه باس در ولتاژ کم دو سر کلید

مطابق استاندارد ANSI C50.41 [۱۱] و [۱۴] در صورتیکه مقدار ولت بر هرتز پریونیت دو سر کلید CB_2 (پارامتر E_R) مطابق رابطه (۲) کمتر از ۱,۳۳ باشد، موتور توانایی تحمل جریان هجومی را داشته و می‌توان از این شرط برای بستن مطمئن کلید CB_2 استفاده نمود.

$$E_R = \sqrt{E_S^2 + (E_M / f)^2 - 2E_S(E_M / f)\cos\theta} \qquad (۲)$$

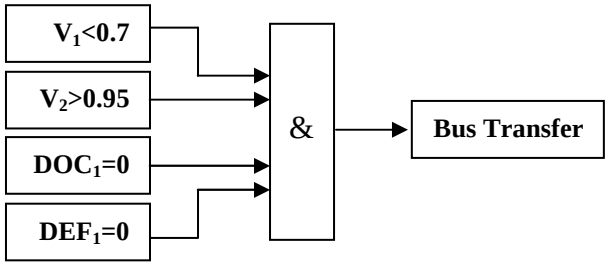
در رابطه فوق E_S دامنه ولتاژ فیدر سالم در فرکانس نامی شبکه (بر حسب پریونیت)، E_M دامنه ولتاژ القایی در ترمینال موتور بعد از قطع تغذیه (بر حسب پریونیت) و f فرکانس ولتاژ ترمینال موتور (پریونیت در مبنای فرکانس نامی شبکه) و θ اختلاف زاویه ولتاژ فیدر سالم و ولتاژ القایی ترمینال موتور در لحظه قبل از وصل کلید می باشد.

در صورتی که به دلیل اینرسی بالای مجموعه بار و روتور، اختلاف زاویه ولتاژ فیدر سالم با ولتاژ القایی در ترمینال موتور ناچیز باشد و به ویژه در حالتی که تعداد و ظرفیت موتورهای سنکرون با اینرسی بالا نسبت به سایر بارها زیاد باشد، پارامتر E_R کمتر از ۱,۳۳ بوده و روش جابجایی سریع تغذیه باس مفید است. با توجه به اینکه تحقق این شرط در صورت جابجایی سریع تغذیه طی زمان کوتاه حدود ۲۰۰ میلی ثانیه امکان پذیر می باشد، لذا در برخی از پروژه های صنعتی داخل کشور از شرط زمانی با تنظیم ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی ثانیه برای انتقال سریع باس استفاده شده است [۱۵]. لازم به ذکر است که عملکرد موفق این روش به تعداد موتورهای موجود در شبکه و مقدار سایر بارهای متصل به باس نیز بستگی داشته و ممکن است در برخی از حالات، شرط $E_R < 1.33$ برقرار نباشد. از طرف دیگر وجود اتصال کوتاه در فیدر ۱ باعث تغذیه خطا توسط موتور (که به ژنراتور القایی تبدیل شده است) و در نتیجه افت سریعتر سرعت موتور می شود. در چنین حالتی ممکن است اختلاف زاویه ولتاژهای دو طرف کلید CB2 بیش از حد مجاز شده و انتقال فیدر تغذیه باس باعث عبور جریان هجومی شدید گردد.

۴-۳- روش پیشنهادی در انتقال سریع باس

برای داشتن وصل مجدد سریعتر از روش بیان شده در زیر بخش ۳-۲، می توان از طرح پیشنهادی شکل (۸) استفاده نمود. این روش در صورت وجود اتصال کوتاه در باس یا فیدرهای خروجی آن اجازه تغییر تغذیه را نمی دهد. ضمنا در مجموع بدون در نظر گرفتن تاخیر سیستم حفاظتی می توان مجموع زمان تاخیر کلیدها را تقریبا به نصف مقدار طرح متداول (که حدود ۱۰۰ میلی ثانیه است) برساند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]



شکل (۸): منطق کنترلی پیشنهادی برای انجام انتقال سریع باس بجای روش متداول استفاده از کنتاکتهای کمکی کلید

مطابق شکل (۸) در صورتی که ولتاژ V_1 کمتر از مقدار تنظیمی (مثلا ۰,۷ پریونیت) بوده و ولتاژ V_2 در این زمان بیش از ۰,۹۵ پریونیت باشد و رله های اضافه جریان جهت دار (DOC, DEF) بیانگر عدم وجود خطای فاز یا زمین در سمت بار باشد، در اینصورت می توان نسبت به انتقال سریع باس اقدام نمود. در حالتی استفاده از این روش کارآیی مناسبی دارد که فرورفتگی ولتاژ به طور مداوم در فیدرهای تغذیه کننده باس بوجود نیاید. در چنین حالتی می توان برای افزایش سرعت جابجایی باس از رله ولتاژی با عملکرد آنی برای V_1 و V_2 استفاده کرد. ضمنا در رله های رله های اضافه جریان و خطای زمین جهت دار مذکور، بجای سیگنال تریپ از واحد استارت رله استفاده می شود تا به محض افزایش جریان از مقدار حد عملکرد و تشخیص صحیح جهت خطا، عمل نموده و اجرای الگوریتم انتقال باس را قفل نماید.

۳-۵- جابجایی سنکرون تغذیه باس

پس از قطع تغذیه از فیدر ۱، چنانچه جابجایی سریع تغذیه باس امکان پذیر نباشد، برای اینکه وصل کلید CB2 باعث عبور جریان هجومی بیش از مقدار مجاز نشود و در عین حال بیشترین شانس برای تداوم کارکرد موتور وجود داشته باشد، می توان کلید CB2 را در زمانی وصل کرد که اختلاف زاویه ولتاژ موتور و فیدر ۲ به حدود ۳۶۰ درجه برسد که به این روش جابجایی سنکرون یا جابجایی همفاز[۶] گفته می شود. در چنین حالتی ولتاژ دو سر کلید CB2 به حداقل مقدار رسیده (ولتاژ متناظر با زمان حدود ۴,۲ ثانیه در شکل ۵) و لذا بهترین زمان برای وصل کلید CB2 است. در این حالت بدیهی است که E_R نیز کمتر از مقدار مجاز می باشد. در این روش لازم است اختلاف ولتاژ دو سر CB2 با دقت مناسبی برای حداقل ۱۰۰ میلی ثانیهٔ بعد پیش بینی گردد.

۳-۶- جابجایی تغذیه باس در صورت افت ولتاژ ترمینال موتور

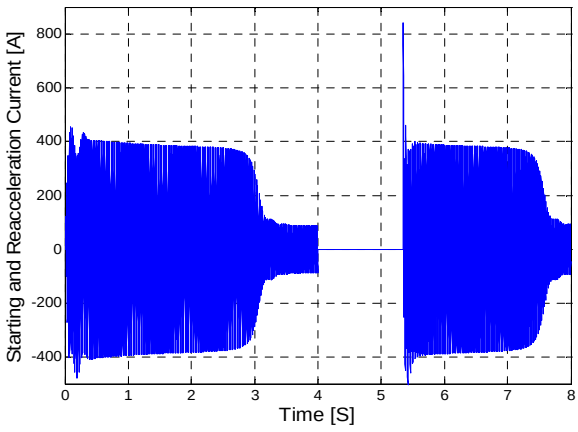
در صورتی که روش‌های قبلی برای جابجایی فیدر تغذیه کننده باس بار اعمال نشود، می توان جابجایی تغذیه را در زمانی انجام داد که به دلیل افت شدید ولتاژ القایی در ترمینال موتور حتما از آن به بعد شرط $E_R<1.33$ محقق خواهد شد. البته محاسبه مقدار E_R نیاز به محاسبه دامنه ولتاژ و فرکانس دارد، و لذا برای ساده تر شدن منطق کنترلی در مراجع مختلف پیشنهاد شده است که بجای بررسی شرط مذکور، چنانچه ولتاژ موتور (E_M) کمتر از ۰,۲۵ پریونیت باشد، نسبت به بستن کلید CB2 اقدام شود [۱۴].

مطابق شکل (۳) دامنه ولتاژ القایی در ترمینال موتور، پس از گذشت ۱,۳۴ ثانیه از قطع تحریک به ۲۵٪ مقدار نامی می رسد و در این حالت سرعت موتور برابر ۰,۴۲ پریونیت است. بنابراین در این طرح نیز می توان قبل از توقف کامل موتور، نسبت به برگشت نسبتا سریع آن به شبکه اقدام نمود. پیاده سازی این روش بسیار ساده بوده و نیازی به الگوریتم پیچیده تخمین ولتاژ القاء شده در موتور ندارد. البته باید توجه نمود که با توجه به کاهش تدریجی فرکانس ولتاژ القایی در ترمینال موتور، از روشی برای اندازه گیری دامنه ولتاژ استفاده شود که به فرکانس حساس نباشد که در بند ۴-۱ این روش معرفی می شود.

۳-۷- جابجایی تغذیه باس در زمان طولانی

در این روش بجای اندازه گیری ولتاژ از یک تایمر برای انتقال تغذیه باس استفاده می شود. زمان تایمر به نحوی تنظیم می‌شود که به ازاء حداکثر بار مکانیکی متصل به موتور، ولتاژ موتور پس از قطع تغذیه آن تا مقدار کمتر از ۰,۲۵ پریونیت افت نماید [۱۴].

در کلیه روش های ترتیبی (۳-۲ تا ۳-۷) که برای مدت کوتاهی ولتاژ تغذیه موتور قطع می شود، با توجه به افت سرعت موتور و افزایش لغزش، در صورت وصل کلید CB2 در زمان مناسب، جریان هجومی عبوری از موتور تقریبا برابر جریان روتور قفل شده در ولتاژ نامی و یا کمتر از آن بوده ولیکن به دلیل سرعت اولیه موتور و رسیدن سریع لغزش به مقدار نامی، زمان عبور جریان راه اندازی محدود می شود. بنابراین بعد از وصل مجدد تغذیه موتور گردان تنش حرارتی کمی نسبت به راه اندازی از حالت سکون به موتور وارد می شود. مثلا در صورت استفاده از روش ۳-۶ مطابق شکل (۹) زمان راه اندازی از ۳ ثانیه به حدود ۲ ثانیه محدود می شود.



شکل (۹): جریان راه اندازی اولیه و پس از انتقال تغذیه باس بعد از بی-برقی موتور به مدت ۱,۳۴ ثانیه (رسیدن ولتاژ موتور به ۰,۲۵ پریونیت)

بنابراین حتی در صورتی که تداوم کارکرد موتور اهمیتی نداشته باشد، مناسب است که در شینه‌های با تعداد بارهای موتوری زیاد که طراحی و بهره برداری از آنها مطابق شکل (۱) می باشد، به منظور کاهش زمان راه اندازی مجدد برخی از روشهای انتقال باس را مورد استفاده قرار

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.1- Spring & Summer 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]

داد. این کار در افزایش عمر موتور و بار مکانیکی متصل به آن اهمیت دارد.

نکته مهمی که بایستی مورد توجه قرار گیرد این است که گاهی تنظیم رله های حفاظتی و همچنین طراحی شبکه صنعتی و به ویژه تعیین سطح مقطع فیدر تغذیه کننده باس بار به نحوی انجام می شود که فقط امکان راه اندازی یک یا تعداد محدودی موتور به صورت همزمان بوده و نمی توان همه موتورها را با هم راه اندازی نمود که این محدودیت ناشی از افت ولتاژ زیاد باس بار به هنگام عبور جریان راه اندازی موتورها می باشد. معمولا ظرفیت موتورهای الکتریکی به نحوی انتخاب می شود که در ۸۰٪ ولتاژ نامی قادر به گردش بار مکانیکی نامی باشند [۱۶] و لذا در مرحله طراحی و اجرای منطق انتقال فیدر تغذیه باس بایستی فقط موتورهایی که تداوم تغذیه آنها اهمیت دارند انتخاب شوند و مجموع ظرفیت آنها به نحوی باشد که در حالت خروج سایر بارهای متصل به باس، ولتاژ ترمینال موتور پس از شتاب گیری مجدد موتورها (پس از انتقال فیدر تغذیه باس) کمتر از ۰٫۸۵ پریونیت نشود. در چنین حالتی که قبل از توقف کامل موتور عمل انتقال تغذیه باس انجام می شود، زمان راه اندازی موتور کاهش یافته و لذا از نقطه نظر زمان مجاز راه اندازی می توان در تعیین مجموع ظرفیت موتورهایی که بطور همزمان در طرح کنترلی انتقال تغذیه باس مشارکت دارند، افت ولتاژ مجاز بیشتری را نسبت به حالت راه اندازی در حالت سکون در نظر گرفت.

۴- پیاده‌سازی طرح جابجایی سنکرون تغذیه باس

در میان روشهای جابجایی تغذیه باس، طرح جابجایی سنکرون باعث ایجاد کمترین تنش حرارتی و مکانیکی به موتور شده و روش مناسبی برای پیاده سازی در شبکه های صنعتی می باشد. برای این منظور بایستی پارامتر مناسبی از شکل موج ولتاژ موتور به صورت یک معادله ریاضی تقریب زده شده تا برای پیش بینی در زمانهای آتی استفاده گردد و لحظه مناسب وصل کلید قدرت برای انتقال تغذیه باس تعیین شود.

۴-۱- جابجایی سنکرون بر اساس روش تقریبی محاسبه زاویه فاز

در مراجع [۴] و [۱۴] عملکرد رله صنعتی Motor Bus Transfer ساخت شرکت Beckwith Electric معرفی شده است که در آن اختلاف فاز بین ولتاژ القایی در ترمینال موتور و ولتاژ فیدر سالم محاسبه شده و از آن برای تعیین لحظه مناسب بستن کلید قدرت فیدر رزرو استفاده شده است. البته این رله بجای تخمین مستقیم معادله اختلاف زاویه فاز، به منظور پیاده سازی ساده تر و با حجم محاسبات کمتر در نرم افزار رله از بسط تیلور آن حول t_1 در زمان $t=t_1+T_B$ مطابق رابطه (۳) استفاده نموده و در آن از مشتقات بالاتر از ۲ صرف نظر شده است.

$$\theta(t_1+T_B)=\theta(t_1)+T_B\times\theta'(t_1)+\frac{T_B^2}{2}\theta''(t_1) \qquad (۳)$$

برای محاسبه رابطه (۳) در فضای دیجیتال از رابطه (۴) استفاده می‌شود.

$$\theta(t_1+T_B)=\theta(t_1^0)+T_B\times\frac{\theta(t_1^{-1})-\theta(t_1^0)}{\Delta t}+\frac{T_B^2}{2}\left(\frac{\theta(t_1^{-2})-2\theta(t_1^{-1})+\theta(t_1^0)}{\Delta t^2}\right) \qquad (۴)$$

T_B زمان مورد نیاز برای وصل کلید فیدر رزرو، t_1^0 زمان نمونه برداری جدید و انجام محاسبات، t_1^{-1} و t_1^{-2} به ترتیب دو و یک نمونه قبل از زمان t_1^0، و پارامتر $\theta(t_1^i)$ برابر اختلاف زاویه محاسبه شده بین ولتاژ موتور و ولتاژ فیدر سالم در نمونه iام قبل از زمان t_1 است. در روابط (۵) محاسبه اختلاف زاویه برای دو نمونه متوالی نشان داده شده است.

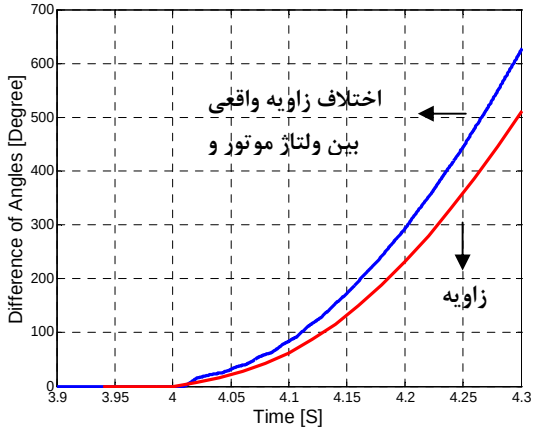
$$\begin{aligned}\theta_2&=\theta_1+360^\circ\times\Delta f_1\times\Delta t\\ \theta_3&=\theta_2+360^\circ\times\Delta f_2\times\Delta t\\ &=\theta_1+360^\circ\times\Delta t(\Delta f_1+\Delta f_2)\end{aligned} \qquad (۵)$$

با تعمیم رابطه بالا، رابطه (۶) برای محاسبه اختلاف زاویه در نمونه iام استنتاج می شود.

$$\theta_i=\theta_1+360^\circ\times\Delta t\times\sum_{k=1}^{i}\Delta f_k \qquad (۶)$$

در رابطه (۶) مقدار θ_1 به اختصار معادل $\theta(t_1^0)$ در نظر گرفته شده است و اختلاف فرکانس Δf_k با روش عبور از صفر[۷] محاسبه می‌شود.

در شکل (۱۰) مقدار واقعی و تخمینی اختلاف زاویه ولتاژ فیدر رزرو و ترمینال موتور نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۰) روش پیاده سازی شده بر مبنای مرجع [۱۴] که در رله های ساخت شرکت Beckwith Electric مورد استفاده قرار گرفته است، در کنار سادگی محاسبات از دقت خیلی زیادی برخوردار نبوده و در موتور شبیه سازی شده در این مقاله حدود ۲۷ میلی ثانیه در لحظه صفر شدن اختلاف فاز بین موتور و فیدر رزرو با مقدار واقعی آن اختلاف دارد.



شکل (۱۰): نمایش میزان خطا در تخمین اختلاف زاویه بر اساس روش پیشنهادی در مرجع [۱۴]

لازم به ذکر است که وصل مجدد تغذیه موتور با در نظر گرفتن خطای فوق الذکر تنش مکانیکی و الکتریکی نسبتا کمی به موتور وارد می کند. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از روش مناسب‌تری که در بخش بعدی به تفصیل بیان می شود، تخمین بسیار دقیقی از صفر شدن اختلاف ولتاژ بین موتور و فیدر رزرو انجام شده تا حداقل تنش حرارتی و مکانیکی ممکن پس از وصل فیدر رزرو به موتور وارد شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]

برای این منظور دامنه و فرکانس ولتاژ القایی در ترمینال موتور پس از جدا شدن از شبکه به صورت دو پارامتر مجزا محاسبه شده و از آنها برای تقریب شکل موج ولتاژ دو سر کلید CB_2 استفاده شده است.

۴-۲- محاسبه دامنه و فرکانس ولتاژ موتور

به منظور محاسبه دامنه ولتاژ از الگوریتم فوریه تمام سیکل استفاده شده است. در این الگوریتم سیگنال بر روی محورهای متعامد سینوسی و کسینوسی تصویر می شود. رابطه (۷) بسط تابع $V_M(t)$ را بر اساس مولفه های سینوسی و کسینوسی نشان می‌دهد.

$$V_M(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \qquad (۷)$$

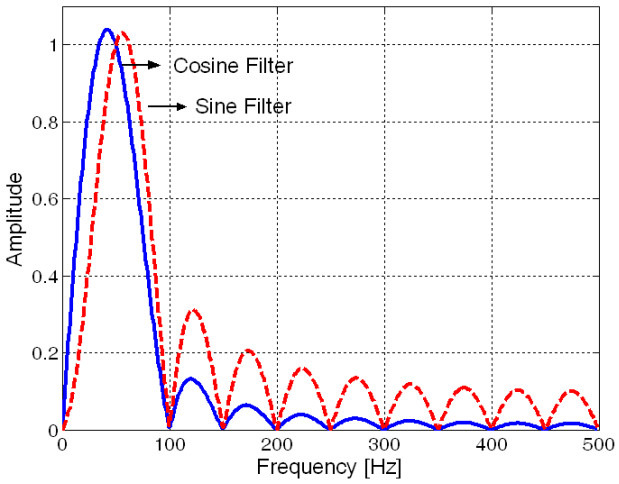
مقدار حقیقی و موهومی هارمونیک اول ولتاژ موتور از رابطه (۸) محاسبه می شود.

$$a_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} [V_M(n) \sin(\frac{2\pi n}{N})]$$
$$b_1 = \frac{2}{N} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} [V_M(n) \cos(\frac{2\pi n}{N})] \qquad (۸)$$

دامنه و زاویه ولتاژ V_M از رابطه (۹) محاسبه می شود[۱۶].

$$EM_{Peak} = \sqrt{{a_1}^2 + {b_1}^2}$$
$$\theta = \tan^{-1}(\frac{b_1}{a_1}) \qquad (۹)$$

پارامتر N، تعداد نمونه برداری از سیگنال V_M در یک سیکل کامل از ولتاژ القایی در ترمینال موتور می‌باشد. با توجه به افت تدریجی فرکانس مربوط به ولتاژ القایی در ترمینال موتور، محاسبه دامنه و زاویه از روابط (۸) و (۹) با خطا همراه است. بنابراین لازم است فرکانس ولتاژ القایی در ترمینال موتور نیز محاسبه شده و از آن برای اصلاح پارامتر N استفاده شود. بعلاوه همانطوری‌که درشکل (۱۱) نشان داده شده است، پاسخ فیلترهای متعامد سینوسی و کسینوسی مورد استفاده در الگوریتم فوریه به ازاء فرکانسهای کمتر از ۵۰ هرتز کمتر از یک بوده که موجب می شود دامنه ولتاژ تخمینی کوچکتر از مقدار واقعی باشد [۱۷]. ضمنا با توجه به تغییر دامنه ولتاژ القایی در ترمینال موتور برای تخمین فرکانس آن، از روش "عبور از صفر" استفاده شده است که قادر است در هر نیم سیکل مقدار فرکانس را مستقل از دامنه ولتاژ محاسبه نماید. به علاوه برای تخمین دقیقتر فرکانس از درونیابی خطی برای محاسبه زمان عبور از صفر استفاده شده است [۱۸].



شکل (۱۱): پاسخ فرکانسی فیلترهای متعامد الگوریتم فوریه تمام سیکل با فرکانس نمونه برداری یک کیلوهرتز

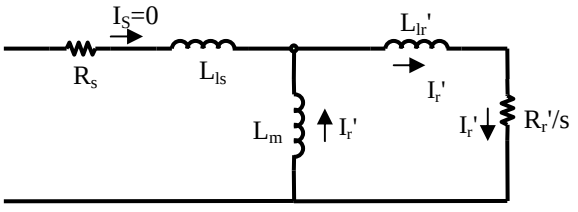
۴-۳- روش پیشنهادی انتقال سنکرون تغذیه باس با تخمین دامنه و فرکانس ولتاژ موتور

فرکانس ولتاژ القایی در ترمینال موتور پس از قطع تغذیه آن از شبکه را می توان بر اساس رابطه (ض-۳) بیان شده در ضمیمه، محاسبه کرد. البته محاسبه فرکانس و تخمین آن در زمانهای بعدی بر اساس رابطه مذکور مشکل است، لذا با توجه به مشابهت شکل موج آن با تابع نمایی، در این مقاله از تابع نمایی مطابق رابطه (۱۰) بجای آن استفاده شده است. مطالعات مبتنی بر شبیه سازی به ازاء حالتهای مختلف بیانگر این است که تقریب مذکور، دارای دقت خوبی در برونیابی و پیش بینی فرکانس موتور تا زمان ۱۰۰ الی ۱۵۰ میلی ثانیه بعد است.

$$f_M(t_1 + T_B) = F(t_1) \times e^{-(t_1+T_B)/\tau_f(t_1)} \qquad (۱۰)$$

فرکانس ولتاژ ترمینال موتور با روش عبور از صفر محاسبه می شود و بر اساس آن با کمک روش حداقل مربعات خطا، پارامترهای $F(t_1)$ و $\tau_f(t_1)$ محاسبه می‌شوند.

پس از قطع تغذیه موتور، مطابق شکل (۱۲) جریانی در مدار روتور به صورت میرا شونده ایجاد می شود که ثابت زمانی میرایی آن برابر ثابت زمانی مدار باز روتور (رابطه ۱۱) می باشد.



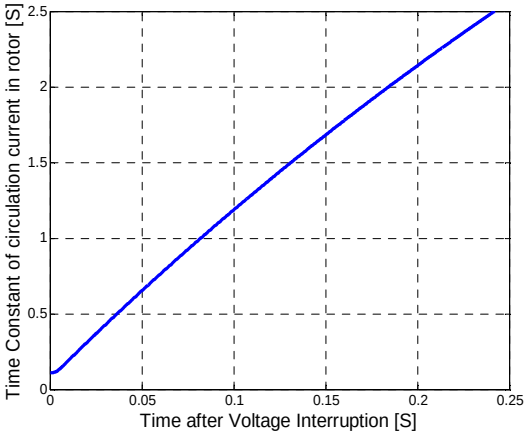
شکل (۱۲): مدار معادل موتور القایی در حالت قطع تغذیه

بنابراین ولتاژ القایی در ترمینال موتور آسنکرون نیز به صورت میرا شونده با ثابت زمانی τ مطابق رابطه (۱۱) افت می کند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]

$$\tau = \frac{L_m + L'_{lr}}{R'_r / s} \qquad (11)$$

مطابق رابطه (۱۱) ثابت زمانی مدار باز روتور به لغزش (سرعت) موتور بستگی دارد. در لحظات اولیه بعد از قطع تغذیه موتور، به دلیل اینکه لغزش نامی موتور معمولا بین ۳ تا ۵ درصد می باشد، لذا ثابت زمانی مدار باز روتور کوچک بوده و ولتاژ القایی در ترمینال موتور با شیب زیادی افت می‌کند. ضمنا با کاهش سرعت موتور و افزایش S، ثابت زمانی τ نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۱۳) ثابت زمانی مدار باز موتور شبیه سازی شده در این مقاله از لحظه قطع تغذیه موتور تا حدود زمان مناسب برای وصل فیدر رزرو نشان داده شده است.



شکل (۱۳): ثابت زمانی مدار باز روتور پس از قطع تغذیه مطابق رابطه (۱۱)

مطابق شکل (۱۳) ثابت زمانی مدار باز را می توان بصورت رابطه خطی بر حسب زمان بیان نمود و لذا شکل موج دامنه ولتاژ القاء شده در ترمینال موتور را می توان پس از قطع تغذیه، با دقت مناسبی بصورت رابطه (۱۲) تقریب زد.

$$E_M(t_1 + T_B) = V(t_1) \times e^{-t/(at+b)} \qquad (12)$$

با توجه به اینکه محاسبه ضرایب $V(t_1)$، a و b از معادله بالا با روش حداقل مربعات خطا نیاز به حل دستگاه معادلات غیر خطی داشته و پیاده سازی آن در رله به دلیل زمان زیاد مورد نیاز برای حل آن قابل اجرا نمی باشد، بنابراین از بسط تیلور آن تا مشتق دوم استفاده می‌شود که معادله ساده شده آن مطابق رابطه (۱۳) می‌باشد. بررسی انجام شده در این مقاله نشان می دهد که تقریب درجه دو از شکل موج دامنه ولتاژ میرا شونده دقت مناسبی در پیش بینی دامنه ولتاژ تا زمان ۱۰۰ الی ۱۵۰ میلی ثانیه بعد دارد.

$$E_M(t) = V(t_1)\left[1 - \frac{1}{b}t + \frac{2a+1}{2b^2}t^2\right] \qquad (13)$$

دامنه ولتاژ E_M بر اساس رابطه (۹) از لحظه پس از قطع تغذیه تا زمان t_1 محاسبه می شود و بر اساس آن پارامترهای $V(t_1)$، a و b با روش حداقل مربعات خطا محاسبه می شود.

به این ترتیب می توان بر اساس روابط (۱۰) و (۱۳)، شکل موج ولتاژ القایی در ترمینال موتور القایی جدا شده از شبکه را مطابق رابطه (۱۴) محاسبه نمود.

$$V_M(t_1 + T_B) = E_M \times Sin(2\pi \times f_M \times (t_1 + T_B) + \varphi) \qquad (14)$$

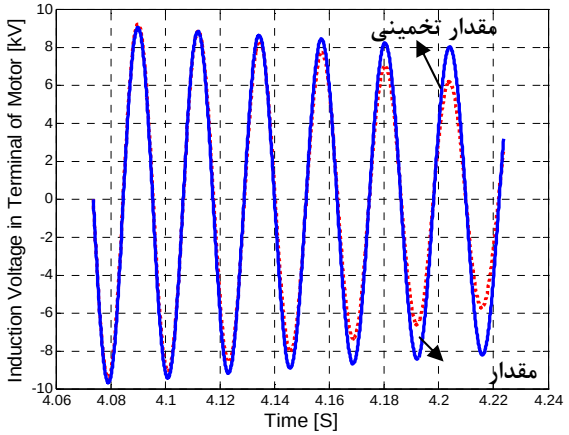
با استفاده از رابطه (۱۵) می توان دامنه موج ولتاژ القاء شده در ترمینال موتور را از زمان t_1=80 ms تا مدت زمان T_B ثانیه (زمان بستن کلید) پس از آن محاسبه نمود. برای اینکه ولتاژ محاسبه شده مطابق رابطه (۱۵) با شکل موج واقعی همزمان باشد، لازم است زاویه φ به طور دقیق محاسبه شود. برای این منظور زاویه φ در لحظه عبور از صفر ولتاژ واقعی تعیین می شود. به عنوان نمونه با کمک ۸۰ میلی ثانیه از داده های پس از قطع تغذیه(t_1=80ms)، معادلات مربوط به تخمین دامنه ولتاژ القایی در ترمینال موتور و فرکانس آن با روش حداقل مربعات خطا محاسبه شده که در رابطه (۱۵) نشان داده شده است.

$$E_M(0.08 + t) = -89.9(0.08 + t)^2 + 0.73(0.08 + t) + 9.98$$
$$f_M(0.08 + t) = 48.7 \times e^{-(0.08+t)/2.97} \qquad (15)$$

بنابراین معادله شکل موج ولتاژ القایی در ترمینال موتور از لحظه انجام محاسبات (t_1) تا t ثانیه بعد از آن، برابر است با:

$$V_M(0.08 + t) = E_M(0.08 + t) \times Sin(2\pi \times 48.7 e^{\frac{-(0.08+t)}{2.97}} - 1.6) \qquad (16)$$

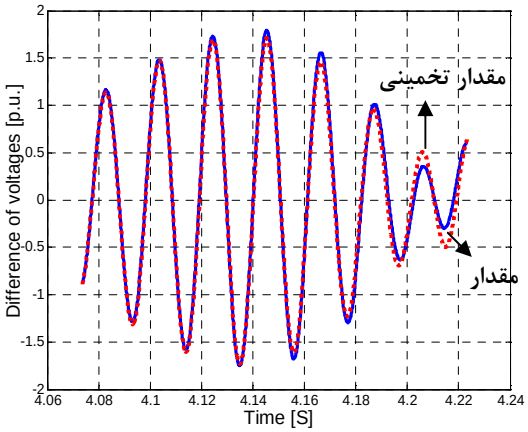
در شکل (۱۴) ولتاژ واقعی القایی در ترمینال موتور و مقدار محاسبه شده نشان داده است. همپوشانی مناسب این دو شکل موج بیانگر تخمین صحیح ولتاژ القایی موتور تا حدود ۱۵۰ میلی ثانیه بعد می باشد. مطابق شکل (۱۴) تخمین فرکانس ولتاژ القاء شده در ترمینال موتور تا ۱۵۰ میلی ثانیه بعد، از دقت خوبی برخوردار است ولی تخمین دامنه ولتاژ تا زمان ۱۵۰ میلی ثانیه حدود۳۰ درصد و تا زمان ۱۰۰ میلی‌ثانیه تا حدود ۱۰ درصد خطا دارد.



شکل (۱۴): ولتاژهای واقعی و تخمینی از ترمینال موتور پس از قطع تغذیه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]

در شکل (۱۵) اختلاف ولتاژ فیدر سالم و ولتاژ القایی در ترمینال موتور (ولتاژ دو سر کلید فیدر رزرو) در دو حالت تخمینی و واقعی نشان داده شده است.

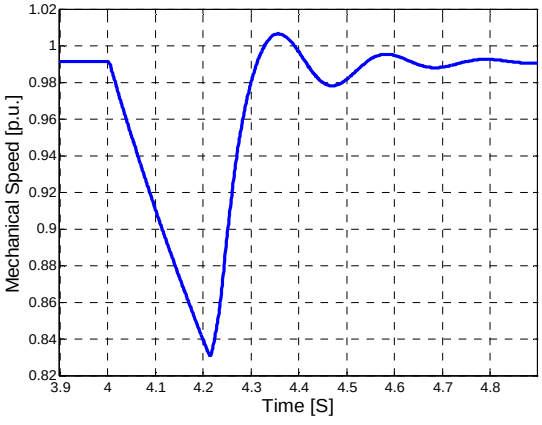


شکل (۱۵): ولتاژهای واقعی و تخمینی دو سر کلید CB2

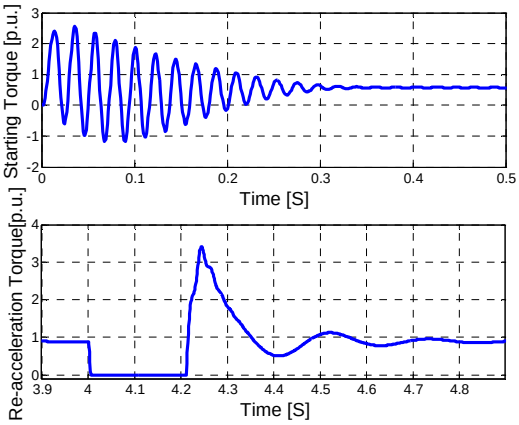
همانطور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است، ولتاژ تخمینی تا زمان حدود ۱۵۰ میلی ثانیه، تطابق مناسبی با ولتاژ واقعی داشته و لذا از این روش می توان برای تعیین لحظه وصل کلید قدرت استفاده نمود.

به منظور تعیین لحظه وصل کلید قدرت، می توان متوسط زمانی که V_{CB2} در باند $\pm 0.6\ p.u.$ قرار می گیرد را محاسبه کرده (زمان $T^* = (4.198 + 4.227)/2 = 4.212\ s$) و لحظه مناسب وصل کلید را بر اساس زمان مورد نیاز برای بستن کلید قدرت (فرض T_B=60 ms) و ارسال فرمان به کویل وصل[۸] کلید قدرت (زمان حدود ۱۰ میلی ثانیه) تعیین نمود. بنابراین در این مثال بایستی فرمان بستن کلید در زمان ۴,۱۵۲ ثانیه صادر شود.

در صورتی که کلید CB_2 دقیقا در زمان ۴,۲۱۲ ثانیه بسته شود، در اینصورت شکل موج سرعت مکانیکی موتور، گشتاور الکتریکی و جریان عبوری از موتور مطابق شکل های (۱۶) تا (۱۸) خواهد شد که مبین برگشت سریع سرعت موتور به همراه وارد شدن تنش نسبتا کم به موتور و شبکه است.



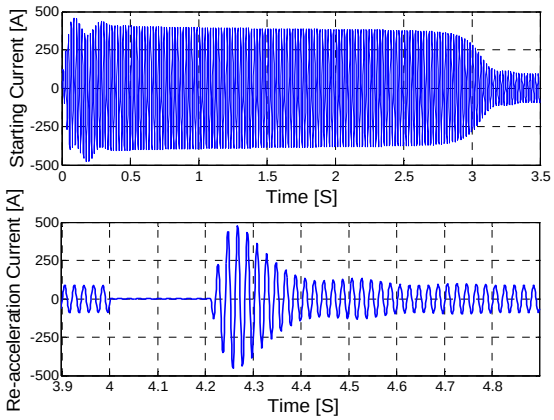
شکل (۱۶): سرعت مکانیکی موتور از قطع تغذیه در زمان ۴ ثانیه تا وصل مجدد آن در زمان ۴,۲۱۲ ثانیه



شکل (۱۷): گشتاور الکتریکی موتور در حالت راه اندازی از حالت سکون و حالت شتاب گیری مجدد موتور پس از وصل فیدر رزرو

مطابق شکل (۱۶) افت سرعت موتور در حین انتقال تغذیه باس، فقط ۱۶٪ می باشد و لذا تداوم کارکرد موتور حفظ خواهد شد. مطابق شکل (۱۷) گشتاور الکتریکی وارد بر موتور بعد از وصل فیدر رزرو، کمی بیشتر از گشتاور راه اندازی بوده ولی به مراتب از گشتاور منفی بوجود آمده هنگام وصل فیدر رزرو در زمان نامناسب (شکل ۷) کمتر است.

همانطور که در شکل (۱۸) مشاهده می شود، در این حالت جریان هجومی عبوری از فاز A (و نظیر آن در سایر فازها) در زمان بسیار کوتاهی میرا شده و برابر جریان بار خواهد شد. بنابراین تنش حرارتی و مکانیکی نسبتا کمی به موتور و شبکه قدرت وارد می شود.



شکل (۱۸): جریان عبوری از فاز A موتور در حین راه اندازی اولیه (از حالت سکون) و پس از وصل سنکرون کلید CB2

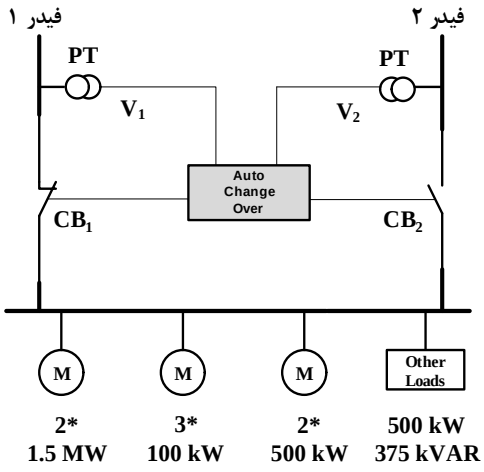
لازم به ذکر است که می توان زمان مناسب برای وصل فیدر رزرو را فقط بر مبنای اختلاف فاز بین ولتاژ تخمینی ترمینال موتور و ولتاژ فیدر سالم تعیین نمود. ولی با محاسبه دامنه ولتاژ القایی در موتور علاوه بر تعیین زمان مناسب وصل کلید، می توان انواع دیگر انتقال تغذیه باس را نیز اجرا نمود. بنابراین در صورت پیاده سازی این الگوریتم در یک رله صنعتی بایستی علاوه بر تخمین فرکانس موتور (و یا اختلاف زاویه بین

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]

ولتاژ موتور و فیدر رزرو)، دامنه ولتاژ القایی در ترمینال موتور نیز محاسبه شود.

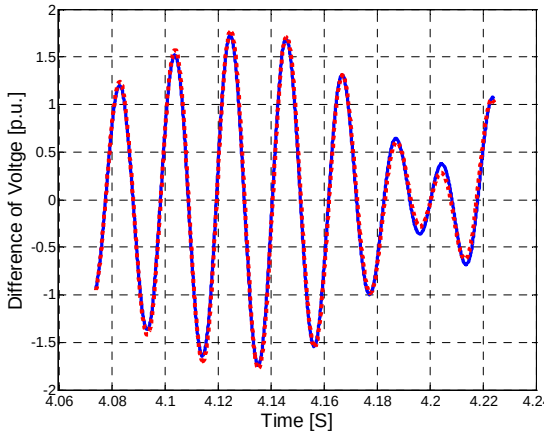
۵- طرح های جابجایی سنکرون در شبکه پیچیده

در بخش ۴ رفتار یک موتور القایی پس از جدا شدن از شبکه مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که روش پیشنهادی برای تخمین شکل موج ولتاژ القایی در ترمینال موتور برای استفاده در انتقال سنکرون تغذیه باس مناسب می باشد. نکته قابل توجه این است که در شبکه های صنعتی ممکن است موتورهای متعددی با ظرفیتها و کاربریهای متفاوت به همراه بارهای غیر موتوری به باس بار متصل باشند که در شکل موج ولتاژ القا شده در باس بار پس از بی برق شدن فیدر ۱ تاثیر گذار هستند. لذا شبکه ای متشکل از دو موتور القایی ۱،۵ مگاوات متصل به بار مکانیکی با گشتاور $T_L = 0.85\omega_m^2 + 0.05$، سه موتور صد کیلوواتی متصل به بار مکانیکی با گشتاور $T_L = 0.8\omega_m + 0.1$ و دو موتور ۵۰۰ کیلو واتی متصل به بار مکانیکی با گشتاور $T_L = 0.2\omega_m^2 + 0.25\omega_m + 0.3$ و بار امپدانس ثابت با توان ۰،۵ مگاوات (با ضریب توان ۰،۸ پس فاز) مطابق شکل (۱۹) مورد مطالعه قرار می گیرد.



شکل (۱۹): شبکه مورد مطالعه برای بررسی تکمیلی الگوریتم پیشنهادی

از لحظه بی برق شدن باس بار به مدت ۸۰ میلی ثانیه، سیگنالهای زمانی ولتاژ القاء شده در باس بار پس از قطع تغذیه، جهت پیش بینی شکل موج ولتاژ دو سر کلید CB_2 (اختلاف ولتاژ بین منبع سالم و ولتاژ القایی در ترمینال موتور) محاسبه شده و با استفاده از نرم افزار تهیه شده در محیط MATLAB مورد بررسی قرار می گیرد. مطابق شکل (۲۰) که نتیجه این برنامه را نشان می‌دهد، ولتاژ تخمینی و ولتاژ واقعی اندازه گیری شده همپوشانی خوبی با یکدیگر دارند که مبین مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی برای پیش بینی ولتاژ باس بار جدا شده از شبکه می‌باشد. لازم به ذکر است که در این حالت حداکثر پیش بینی خطای دامنه ولتاژ القایی در موتور تا ۱۵۰ میلی ثانیه به کمتر از ۱۰٪ و تا زمان ۱۰۰ میلی ثانیه به حدود ۵٪ محدود شده است.



شکل (۲۰): ولتاژهای واقعی و تخمینی دو سر کلید CB2 در حضور ترکیبی از بارهای موتوری و امپدانس ثابت

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ضمن بررسی ولتاژ القایی در ترمینال موتور پس از قطع منبع تغذیه، انواع روشهای انتقال تغذیه موتور به فیدر رزرو مورد بررسی قرار گرفت و منطق کنترلی مناسبی برای انجام جابجایی سریع فیدر تغذیه باس بر اساس رله های ولتاژی و اضافه جریان جهتی پیشنهاد گردید. بعلاوه در این مقاله روش بیان شده در یکی از رله‌های صنعتی شبیه سازی گردید. این روش در ضمن ساده بودن محاسبات (که عمدتا در رله های قدیمی و به دلیل محدودیتهای سخت افزاری اهمیت داشته است) دارای نقاط ضعفی از قبیل عدم دقت زیاد در تخمین زمان مناسب وصل کلید فیدر رزرو نیز می باشد.

به منظو بهبود روش انتقال باس، ابتدا الگوریتم مناسبی برای تخمین دامنه و ولتاژ القاء شده در ترمینال موتور پیشنهاد گردید که روابط مورد استفاده برای این منظور بر مبنای مدار معادل موتور استخراج گردید. پیاده سازی این روش جدید در شبکه با یک موتور و نیز شبکه با چندین بار موتوری و امپدانسی نشان دهنده موفقیت الگوریتم پیشنهادی در تخمین صحیح زمان وصل کلید قدرت برای جابجایی سنکرون فیدر تغذیه کننده می باشد. اجرای این روش که قابلیت پیاده سازی در رله های صنعتی را دارد، باعث حداقل شدن تنشهای مکانیکی و حرارتی وارد بر موتور خواهد شد و می تواند جایگزین روشهایی نظیر جابجایی سریع یا جابجایی در ولتاژ باقیمانده کم شود که در حال حاضر مورد قبول برخی سازندگان موتور است.

پیوست

معادله دینامیکی موتور الکتریکی گردان مطابق رابطه (پ-۱) است که در آن ω_m سرعت زاویه‌ای مکانیکی، T_e گشتاور الکتریکی تولیدی موتور و T_m گشتاور مقاوم بار مکانیکی می‌باشد [۱۹].

$$J\frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m \qquad (پ-۱)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]

با قطع منبع تغذیه و صفر شدن گشتاور الکتریکی، موتور آسنکرون به ژنراتور تبدیل می شود که در این حالت معادله (پ-۱) به فرم $J \times d\omega_m / dt = T_m$ در می آید. گشتاور مکانیکی بار را می‌توان بطور عمومی با یک معادله مرتبه دو از سرعت زاویه ای بیان نمود [۲۰] و لذا پس از قطع تغذیه موتور و صفر شدن T_e معادله دینامیکی موتور گردان را مطابق رابطه (پ-۲) خواهد بود.

$$J_0 \frac{d\omega}{dt} + k_1\omega^2 + k_2\omega + k_3 = 0 \qquad (پ-۲)$$

پاسخ معادله دیفرانسیل در رابطه (پ-۳) نشان داده شده است.

$$\frac{2J_0}{\sqrt{4k_3.k_1 - k_2^2}} tg^{-1} \frac{2k_1.\omega + k_2}{\sqrt{4k_3.k_1 - k_2^2}} = t \qquad (پ-۳)$$

مراجع

[1] A. Raje, and etc, “Bus Transfer Systems: Requirements, Implementation, and Experiences”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 39, No. 1, Jan. 2003, pp. 34-43

[۲] غلامرضا عرب مارکده، محمد صدوق "کنترل مستقیم گشتاور و ضریب توان یک موتور القایی با خطی‌سازی ورودی-خروجی با استفاده از مبدل ماتریسی"، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۰

[3] V. Balamourougan, T. S. Sidhu, and etc, “A New High Speed Bus Transfer Relay-Design, Implementation and Testing”, IEEE Power India Conference, April 2006

[4] R. D. Pettigrew, E. L. Johnson, “Automated Motor Bus Transfer, Theory and Application”, Beckwith Electric Co, New Mexico, Available on-line in www.beckwithelectric.com

[5] D. L. Hornak, D. W. Zipse, ”Automated Bus Transfer Control for Critical Industrial Processes”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, Sep. 1991, pp. 862-871

[6] I.R. Smith, S. Sriharan, "Induction Motor Re-switching Transients", Proc. IEE, Vol. 114, No. 4, April 1967, pp. 503-509

[7] F.P. Flynn, R.D. Slater, W.S. Wood, "Transient Negative Torques in Induction Motors due to Rapid Reconnection of the Supply", Proc. IEE, vol. 116, no. 12, December 1969, pp. 2009-2014

[8] J. Cavaroc, “Assessment of stresses on Induction Motors due to Momentary Interruptions”, Dissertation for the degree of Doctor of Electrical Engineering, North Carolina State University, 2007

[9] A. Kelley, J. Cavaroc, J. Ledford, L. Vassalli, “Voltage Regulator for Contactor Ride-through”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 2, March/April 2000. pp. 697-704.

[10] M. McGranaghan, D. Mueller, and M. Samotyj, “Voltage sags in industrial plants”, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 29, March/April 1993. pp. 397-403.

[11] Service Manual of Synchronism Check Relay, type KAVS 100, ALSTOM Co.

[۱۲] کلید خلاء با ولتاژ نامی ۲۰ کیلوولت ساخت شرکت Areva

[۱۳] مدارک فنی پروژه پتروشیمی مبین، سال ۱۳۸۲

[14] T. R. Beckwith, W. G. Hartmann, “Motor Bus Transfer: Considerations and Methods”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 42, No. 2, April 2006, pp.602-611

[۱۵] جلد فنی اسناد مناقصه فاز هشتم و نهم پروژه پارس جنوبی

[۱۶] مشخصات فنی موتور القایی ۱۰۷۰ کیلووات با ولتاژ ۶ کیلوولت ساخت شرکت Flender Loher

[۱۷] گزارش فاز اول "پروژه *تحقیقاتی تاثیر هارمونیک بر عملکرد رله های دیجیتال*"، کارفرما شرکت برق منطقه ای تهران، حسین مختاری، مجید صنایع پسند، مهدی داورپناه، ۱۳۸۵

[18] M. Sanaye-Passand and V. Jalili Marandi, "Frequency estimation of distorted signals for control and protection of power system," IEE, 8th Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam, April 2004

[۱۹] تحلیل ماشینهای الکتریکی، تالیف پال سی کراوز، ترجمه سید مرتضی سقائیان نژاد و حسن نیک خواجویی، چاپ اول سال ۱۳۷۶

[۲۰] ماشینهای الکتریکی، تئوری، عملکرد و کاربرد، تالیف بیم بهارا، ترجمه دکتر لسانی، دکتر سلطانی، چاپ سوم سال ۱۳۸۴

زیرنویس‌ها

[1] Bus Transfer
[2] Voltage Sag
[3] Synchro-check
[4] Sequential Transfer
[5] Fast Sequential Bus Transfer
[6] In phase Bus Transfer
[7] Zero Crossing
[8] Close Coil

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.9- No.1- Spring & Summer 2012

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-06]