

کلیدزنی سنکرون در خط انتقال جبران سازی نشده با در نظر گرفتن اثر ولتاژ کوپلینگ بین فازها

علیرضا کریم النفس^۱ سید محمد شهرتاش^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه قدرت - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران

alireza.kk.1371@gmail.com

۲- استاد- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه قدرت - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران

shahrtash@iust.ac.ir

چکیده: کلید زنی سنکرون باعث کاهش حالت‌های گذرای ایجاد شده ناشی از کلید زنی در خط انتقال می‌شود. الگوریتم ارائه شده در این مقاله در لحظه ارسال فرمان وصل کلید توسط اپراتور، با در نظر گرفتن ولتاژ کوپلینگ بین فازها، نحوه بسته شدن سنکرون هر سه فاز کلید خط انتقال جبران سازی نشده را در وضعیتی که انتهای خط باز باشد، کنترل می‌کند. الگوریتم مذکور با بدست آوردن مقادیر تاخیر در ارسال فرمان به هر فاز کلید بر مبنای روابط ریاضی، به ازای انواع مختلف پیکر بندی خط انتقال (ترانسپوزه بودن یا نبودن، متعادل بودن یا نبودن) و مقادیر مختلف طول خط و زمان‌های عملکرد مکانیکی برای هر فاز کلید، بستن سنکرون هر سه فاز را کنترل می‌کند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که با توجه به زمان نمونه برداری، هر فاز کلید با خطای حداکثر سه نمونه (معادل اختلاف ۰/۳ میلی ثانیه از زمان بهینه بستن کلید) در وضعیت صفر ولتاژ بسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کلید زنی سنکرون، ولتاژ کوپلینگ، خط انتقال

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.83

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۲/۱۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۵

نام نویسنده مسئول: سید محمد شهرتاش

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

بستن کلید در خط انتقال باعث تولید اضافه ولتاژهایی در طول خط می شود که دامنه آنها گاهی به ۳ pu هم می رسد. با کلید زنی سنکرون (یعنی بسته شدن کلید در لحظه برابری ولتاژ سمت خط و ولتاژ سمت منبع کلید سه فاز)، این اضافه ولتاژها بسیار کاهش می یابند [۱].

شرکت ABB به منظور کلید زنی سنکرون خط انتقال بدون ولتاژ باقیمانده (Trapped voltage)^۱، دستگاه های کلید زنی سنکرون F236 و PWC600 را روانه بازار کرده است. نحوه عملکرد این دستگاهها به صورت خلاصه به شرح زیر است [۲ و ۳]:

- دستگاه F236 یک فاز منبع را به عنوان مرجع در نظر می گیرد و لحظه صفر شدن فاز مرجع را زمان بهینه بسته شدن فاز مرجع انتخاب کرده و زمان بهینه بستن دو فاز دیگر را با اختلاف ۶۰ درجه و ۱۲۰ درجه از زمان بهینه بستن فاز مرجع انتخاب می کند. در این دستگاه ولتاژ باقیمانده و ولتاژ کوپلینگ در نظر گرفته نمی شوند.

- دستگاه PWC600 هم در تعیین زمان بهینه بستن فازها، مشابه دستگاه F236 است ولی در این دستگاه زمان بهینه بستن دو فاز دیگر با اختلاف ۱۲۰ درجه و ۲۴۰ درجه از زمان بهینه بستن فاز مرجع انتخاب می شوند. در این دستگاه نیز ولتاژ باقیمانده و ولتاژ کوپلینگ در نظر گرفته نمی شوند.

در دستگاه های کلید زنی سنکرون مذکور از اثر ولتاژ کوپلینگ که پس از بسته شدن فاز مرجع بر دیگر فازها ایجاد می شود، صرف نظر شده است. با بکارگیری این دستگاه ها کلید سه فاز با اختلاف زمانی از صفر ولتاژ دو سرش بسته می شود [۲ و ۳]. این در حالیست که در صورتی که فاز A به عنوان فاز مرجع انتخاب شود، با بسته شدن این فاز ولتاژ کوپلینگ در فاز B و C ایجاد می شود. با جبران سازی اثر ولتاژ کوپلینگ می توان فازهای B و C کلید را نیز در زمان بهینه که ولتاژ دو سر کلید صفر است، بست.

در مرجع [۴] برای جبران سازی اثر ولتاژ کوپلینگ، به مقادیر زمانی بسته شدن فاز C و B، مطابق با روش های سنتی^۲ کلید زنی سنکرون خط انتقال، مقداری ثابت اضافه یا کم می شود. مقدار ثابت مذکور به دامنه ولتاژ کوپلینگ بستگی دارد و دامنه ولتاژ کوپلینگ نیز به عوامل مختلفی چون طول خط و نوع پیکربندی خط (ترانسپوزر بودن، چند مداره بودن، باندل بودن) بستگی دارد [۴]. بدیهی است این روش برای کلیدزنی در خطوط انتقال بدون Trapped voltage کاربرد دارد.

به طور کلی، در بستن کلید سه فاز خط انتقال جبران سازی نشده به صورت سنکرون باید مراحل زیر مورد توجه باشد:

- توجه به ملازمات حداقلی برای انجام کلید زنی سنکرون که مربوط به مشخصات کلید است و توسط سازنده مشخص می شود. کلید مورد نظر برای کلید زنی سنکرون مناسب نیست اگر که میزان خطای زمانی در عملکرد مکانیکی آن بیش از ۱ میلی ثانیه

باشد و یا مقدار نرخ کاهش استقامت عایقی کلید در لحظه بسته شدن کمتر از ۱ pu باشد (مقدار نرخ کاهش استقامت عایقی نسبت به شیب شکل موج ولتاژ منبع در لحظه عبور از صفر آن که برابر $\omega \cdot V_m$ می باشد، پریونیت می شود درحالیکه ω برابر $2\pi f$ و f برابر فرکانس شبکه و V_m برابر دامنه ولتاژ منبع است) [۴ و ۵].

- محاسبه دقیق مقادیر تاخیر لازم در ارسال فرمان به هر فاز کلید برای بسته شدن هر سه فاز کلید در زمان بهینه [۴ و ۶ و ۷].
- جبران سازی تغییرات ناشی از شرایط محیطی، پیری و بی تحرکی در زمان عملکرد مکانیکی کلید، که با استفاده از داده هایی که از قبل موجود است، انجام می شود [۸].

خلاصه ای از روش های ارائه شده در مقالات با توجه به مراحل اصلی فوق در ادامه آمده است:

- در مرجع [۲] بدون توجه به ملازمات حداقلی، به مورد دوم نیز بدون در نظر گرفتن اثر ولتاژ کوپلینگ و ولتاژ باقیمانده پرداخته شده است و در مورد سوم تنها اثر دما جبران سازی شده است.
- در مراجع [۴] و [۵] و [۷] به مورد اول تا حدی توجه شده است به طوری که حداکثر خطای زمانی در عملکرد مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است و به مورد دوم بدون در نظر گرفتن اثر ولتاژ کوپلینگ و ولتاژ باقیمانده پرداخته شده است و به مورد سوم نیز توجه نشده است.

هدف از ارائه این مقاله بهینه سازی بستن سنکرون کلید در خط انتقال جبران سازی نشده است. در این مقاله با فرض آنکه ملازمات حداقلی برای انجام کلید زنی سنکرون فراهم است و با فرض شرایط لازم برای میرا شدن ولتاژ باقیمانده و صرف نظر کردن از زمان حضور جرقه در حین بسته شدن کلید، زمان بسته شدن برای هر کدام از فازهای کلید خط جبران سازی نشده با در نظر گرفتن ولتاژ کوپلینگ ناشی از بسته شدن کلید در فازهای دیگر محاسبه شده است. الگوریتم مطرح شده در این مقاله قادر است بسته شدن کلیدهای سه فاز را با خطای ۳ نمونه (معادل با ۰/۳ میلی ثانیه انحراف در فرکانس ۱۰ کیلوهرتز) نسبت به زمان بهینه بسته شدن برای هر فاز کنترل کند. وجه تمایز الگوریتم مذکور سادگی، مبنای ریاضیاتی، دقت بالا، مستقل بودن از عواملی مانند طول خط و پیکر بندی خط و ولتاژ منبع و قابلیت عملیاتی شدن آن می باشد.

۲- پارامترهای اصلی در کلیدزنی سنکرون

پارامترهای اصلی در کلید زنی سنکرون عبارتند از: زمان عملکرد مکانیکی، زمان عملکرد الکتریکی، زمان ارسال فرمان وصل توسط اپراتور، دامنه ولتاژ منبع ولتاژ و دامنه پراکندگی در زمان عملکرد مکانیکی کلید.

در این مقاله الگوریتمی برای کنترل بسته شدن کلید در صفر ولتاژ آن، با فرض وجود شرایط لازم برای میرا شدن ولتاژ باقیمانده و صرف نظر کردن از زمان حضور جرقه در حین بسته شدن کلید و زمان

(۱) در لحظه ارسال فرمان وصل به کلید (متناظر با نقطه A در شکل ۱-الف)، مقدار ولتاژ و مقدار مشتق ولتاژ منبع در هر فاز اندازه گیری می شود (که به ترتیب VA و VB و VC و VPA و VPB و VPC نامگذاری می شوند). سپس بر حسب مقادیر بدست آمده، برای هر فاز، فاصله زمانی تا اولین صفر ولتاژ منبع (متناظر با بازه زمانی t در شکل ۱-الف) با استفاده از رابطه (پ-۱)، محاسبه می شود (مقدار مذکور بر حسب میلی ثانیه برای فازهای A و B و C به ترتیب t_A و t_B و t_C نام گذاری می شوند). در مرحله آخر زمان تاخیر در ارسال فرمان وصل به هر فاز (متناظر با TD در شکل ۱-الف) مطابق با معادلات (پ-۲) بر حسب میلی ثانیه به دست می آید. (که به ترتیب TD_A و TD_B و TD_C نامگذاری می شوند).

در این مقاله فرض شده که کلید ایده آل است و استقامت عایقی بی نهایت دارد که با این فرض زمان عملکرد الکتریکی کلید (TA) در معادلات (پ-۱) برابر با صفر در نظر گرفته می شود و TM_A و TM_B مطابق با معادلات (پ-۲) زمان های عملکرد مکانیکی فازهای A و B و C کلید می باشند. با اعمال مقادیر تاخیر بدست آمده در این مرحله همانند عملکرد دستگاه F236 کلید در وضعیت صفر ولتاژ منبع بسته می شود. (در این مرحله، الگوریتم مطرح شده مشابه دستگاه F236 می باشد).

(۲) (با توجه به اینکه ولتاژ کوپلینگ در اولین فازی که بسته می شود موضوعیت ندارد) بنابراین می توان تاخیر متناظر با اولین فازی که بسته می شود را مطابق با مقادیر TD_A یا TD_B یا TD_C انتخاب کرد. در حالت کلی اینکه چه فازی ابتدا بسته شود را می توان بصورت دلخواه انتخاب کرد ولی در این الگوریتم، فازی که فاصله زمانی کمتری تا عملکرد دارد (یعنی فاصله زمانی رسیدن فرمان وصل به کلید تا لحظه برقراری جریان برای آن فاز) مطابق با معادلات (پ-۳)، به عنوان فاز اولی که باید بسته شود انتخاب می شود تا زمان بی برقی فازها نسبت به حالتی که فازها بصورت تصادفی انتخاب شوند، کمتر شود. پس از مقایسه زمان عملکرد فازها، زمان تاخیر متناظر برای اولین فازی که باید بسته شود، انتخاب می شود.

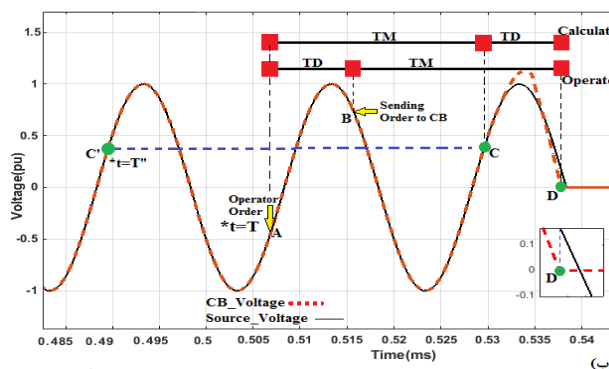
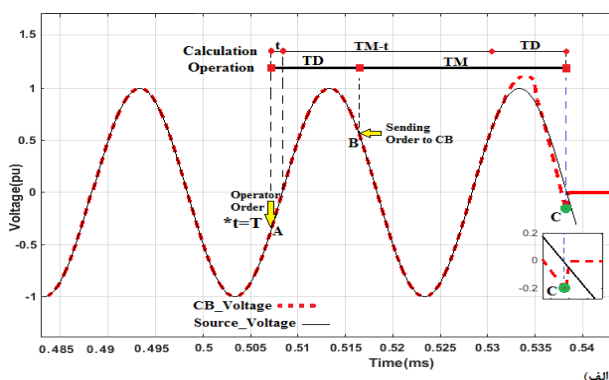
اگر لحظه ارسال فرمان وصل به کلید توسط اپراتور، T فرض شود (مطابق با شکل ۱-ب)، فاز ولتاژ منبع در لحظه $T + TM$ (متناظر با نقطه C در شکل ۱-ب) برای محاسبه زمان تاخیر در ارسال فرمان وصل، مورد نیاز است. با توجه به اینکه این زمان تاخیر، در همان لحظه ارسال فرمان وصل توسط اپراتور محاسبه می شود، بنابراین نیاز است تمامی متغیرهای مورد نیاز از جمله فاز ولتاژ منبع در لحظه $T + TM$ ، با استفاده از اطلاعات قبل از لحظه ارسال فرمان وصل توسط اپراتور، محاسبه شوند. با توجه به اینکه فاز موج سینوسی ولتاژ منبع در هر لحظه با فاز آن در فواصل ۲۰ میلی ثانیه ای قبل یا بعد از آن لحظه برابر است، بنابراین فاز ولتاژ

پراکندگی عملکرد مکانیکی کلید، ارائه شده است. در شکل ۱-الف، نتیجه اجرای الگوریتمی نشان داده شده است که با ارسال فرمان وصل توسط اپراتور (متناظر با نقطه A)، مقدار تاخیر در ارسال فرمان وصل (برای بسته شدن کلید در صفر ولتاژ منبع) بدون در نظر گرفتن ولتاژ کوپلینگ محاسبه شده و پس از گذشت این زمان تاخیر، فرمان وصل به کلید ارسال می شود. (مطابق با شکل ۱-الف، زمان عملکرد مکانیکی کلید برابر با TM می باشد و لحظه ارسال فرمان وصل به کلید متناظر با نقطه B است). همانطور که در شکل مذکور دیده می شود اجرای چنین الگوریتمی منجر به بسته شدن در زمان غیربهبوده شده است. (متناظر با نقطه C)

اما در شکل ۱-ب نتیجه اجرای الگوریتمی ارائه شده است که با ارسال فرمان وصل توسط اپراتور (متناظر با نقطه A)، مقدار تاخیر در ارسال فرمان وصل با در نظر گرفتن ولتاژ کوپلینگ محاسبه می شود (متناظر با TD) و در نهایت منجر به بسته شدن کلید در زمان بهینه شده است. (متناظر با نقطه D)

۳- شرح الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم ارائه شده در این مقاله، برای بستن کلید سه فاز خط انتقال جبران سازی نشده با محاسبه ولتاژ کوپلینگ (در حالتی که که در سمت خط کلید ولتاژ باقیمانده وجود نداشته باشد)، طراحی شده است و عملکرد آن مستقل از مقدار ولتاژ سمت خط می باشد.



شکل (۱): قسمت الف - بسته شدن کلید در نقطه C به دلیل در نظر نگرفتن ولتاژ کوپلینگ، قسمت ب - بسته شدن کلید در نقطه D با در نظر گرفتن ولتاژ کوپلینگ

• مقدار ولتاژ منبع در فازهای A و B و C در زمان های T_A و T_B و T_C اندازه گیری شده و V_{FA} و V_{FB} و V_{FC} نامیده می شوند. مشتق ولتاژ منبع در فازهای A و B و C در زمان های T'_A و T'_B و T'_C محاسبه شده و V_{PA} و V_{PB} و V_{PC} نامیده می شوند. سپس مطابق با روابط (پ-د)، ϕ_A و ϕ_B و ϕ_C در زمان های T_A و T_B و T_C محاسبه می شوند.

(۲) V_{CA/B_pu} و V_{CA/C_pu} دامنه ولتاژ کوپلینگ در فاز B و C بر اثر بسته شدن فاز A می باشند که با استفاده از اطلاعات ضبط شده از شبکه در عملکردهای قبل به دست آمده و در جداولی ثبت شده اند.

(۴) با بسته شدن فاز A و با فرض اینکه در یک سمت کلید، منبع ولتاژ و سمت دیگر آن خط انتقال با انتهای باز باشد، می توان با حل معادله (۲) زمان صفر شدن ولتاژ دو سر کلید را در فاز B و C پس از بسته شدن فاز A بدست آورد.

$$V_{s_B} = V_{CA/B} \quad (۲)$$

$$V_{s_C} = V_{CA/C}$$

در حالیکه V_{s_B} و V_{s_C} ولتاژ منبع در فازهای B و C و $V_{CA/B}$ و $V_{CA/C}$ ولتاژهای کوپلینگ ناشی از بسته شدن فاز A بر فازهای B و C هستند که با ولتاژ منبع در فاز A هم فاز می باشند. با پیرویت کردن پارامترها در معادله (۲)، معادلات (۳) به دست می آیند.

$$\sin(\omega t + \phi_B) = V_{CA/B_pu} \sin(\omega t + \phi_B + 2\pi/3)$$

(۳)

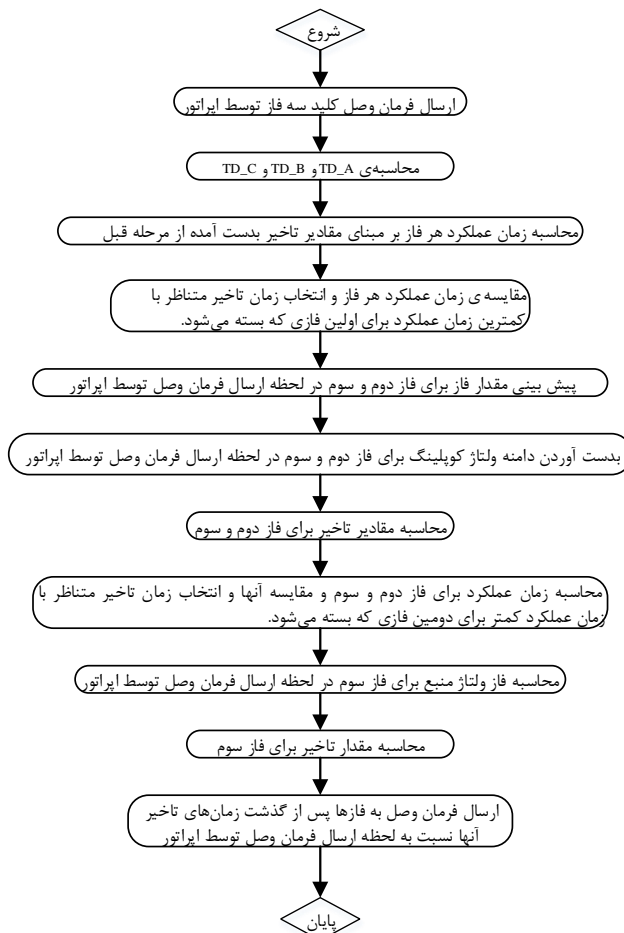
$$\sin(\omega t + \phi_C) = V_{CA/C_pu} \sin(\omega t + \phi_C - 2\pi/3)$$

(۵) با حل معادلات (۳)، t یا همان مقدار تاخیر در ارسال فرمان وصل به فاز B و C بدست می آیند. باید توجه داشت که یکی از این فازها به عنوان دومین فازی که باید بسته شود، انتخاب می شود. سپس مطابق با معادله (پ-۶)، زمان های t_1 تا t_4 برای فاز B و C محاسبه می شوند.

با اعمال شرط مثبت بودن زمان تاخیر، زمان تاخیر TD_{Bc} از میان زمان های t_1 تا t_4 برای فاز B انتخاب می شود. (با شرط مثبت بودن، هر کدام کوچکتر باشد به عنوان زمان تاخیر انتخاب می شود). به همین ترتیب برای فاز C نیز مقدار TD_{Cc} بدست می آید.

(۶) در این مرحله اینکه کدام فاز بسته شود، مطرح می شود. با توجه به اینکه زمان تاخیر در ارسال فرمان به فاز B و C در لحظه ارسال فرمان وصل توسط اپراتور به دست آمده است، می توان مطابق با معادلات (پ-۷)، زمان عملکرد فاز B و C را مقایسه کرد و هر کدام که تاخیر کمتری دارد را به عنوان دومین فازی که باید بسته شود

منبع در لحظه $T + TM$ را می توان با محاسبه مقدار فاز در زمان های بدست آمده مطابق با رابطه (۱) بدست آورد.



شکل (۲): فلوچارت الگوریتم ارائه شده در این مقاله برای انجام

کلیدزنی سنکرون

$$T' = T + TM - n \times (0.020) \quad (۱)$$

در حالیکه TM برای فازهای A و B و C، به ترتیب، برابر با TM_A و TM_B و TM_C است و n عددی صحیح است.

با جایگذاری n_1 مطابق با روابط (پ-۴) در رابطه (۱)، اولین نقطه هم فاز با نقطه C قبل از ارسال فرمان وصل توسط اپراتور که در شکل ۱-ب با نقطه C' نشان داده شده است، محاسبه می شود. توجه به توضیحات مذکور، فاز ولتاژ منبع در لحظه $T + TM$ بصورت زیر محاسبه می شود:

• مقدار n_1 مطابق با روابط (پ-۴) برای هر سه فاز ولتاژ منبع محاسبه شده و به ترتیب n_{1A} و n_{1B} و n_{1C} نام گذاری می شوند.

• زمان T' برای فازهای A و B و C، با جایگذاری n_{1B} و n_{1A} و n_{1C} در رابطه (۱) بدست آمده و به ترتیب T'_A و T'_B و T'_C نامگذاری می شود.

الگوریتم دستگاه F_{236} توالی زمانی بهینه متناظر با ACB به ترتیب برابر صفر و $3/3$ میلی ثانیه و $6/6$ میلی ثانیه می باشد.

با بسته شدن کلید در زمان بهینه بستن، اضافه ولتاژهای ناشی از کلید زنی در خط انتقال با انتهای باز بسیار کاهش می یابند و هر مقدار زمان بسته شدن از زمان بهینه فاصله می گیرد این اضافه ولتاژها افزایش پیدا می کنند، بنابراین مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن کلید می تواند معیار خوبی برای مقایسه عملکرد الگوریتم ها در کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از بسته شدن کلید، باشد.

جدول (۱): مقدار زمان بهینه بستن فازهای B و C پس از بسته شدن فاز A [۴]

پیکر بندی خط	طول خط	زمان بهینه بستن فازهای B و C
ترانسپوز	بیش از ۴۰۰ کیلومتر	$2/9$ و $6/7$
	کمتر از ۴۰۰ کیلومتر	$2/5$ و $6/3$
غیر ترانسپوز	بیش از ۵۰۰ کیلومتر	$2/9$ و $6/7$
	کمتر از ۵۰۰ کیلومتر	$2/5$ و $6/3$

برای سهولت در مقایسه الگوریتم های مختلف، مقدار ولتاژ کلید در لحظه بسته شدن (نسبت به ولتاژ شبکه پریونیت شده است) و فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن هر سه فاز کلید (با فرض برابری زمان های عملکرد مکانیکی فازها در وضعیت های مختلف شبیه سازی)، در هر روش آورده شده است. مقدار انحراف زمانی از لحظه بهینه بستن کلید (معادل با مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن) نیز نشان داده شده است.

(الف) خط غیر ترانسپوز با طول ۱۹۶ کیلومتر و انتهای باز

خط انتقالی با طول ۱۹۶ کیلومتر و غیر ترانسپوز که جبران سازی نشده است مطابق با داده های ورودی خط انتقال انجیرک-رودشور شبیه سازی شده است. در ابتدای این خط انتقال تک مداره، منبعی با دامنه ولتاژ ۵۰۰ کیلو ولت (مطابق با شبکه متناظر با خط انجیرک-رودشور) و انتهای این خط انتقال باز است. (فرض می شود که در سمت خط در هر سه فاز ولتاژ باقیمانده میرا شده و وجود ندارد).

❖ در مرحله اول کلید سه فاز خط انتقال مذکور بصورت تصادفی بسته می شود. ولتاژ دو سر کلید در شکل ۳ نشان داده شده است. در این وضعیت مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن مطابق با شکل مذکور برای فازهای A و B و C به ترتیب برابر pu و $1/12$ و $1/16$ pu (به ترتیب معادل اختلاف های ۵ میلی ثانیه و $4/5$ میلی ثانیه و $4/9$ میلی ثانیه از لحظه بهینه بستن هر فاز کلید) و فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن هر سه فاز کلید، برابر $37/7$ میلی ثانیه می باشد.

انتخاب کرد. (در اینجا فرض می شود فاز B تاخیر کمتری داشته باشد).

(۷) فرض می شود که فاز A اول و فاز B دوم بسته شده اند) حال می توان با حل معادله (۴) برای فاز C، زمان صفر شدن ولتاژ دو سر کلید را در فاز C پس از بسته شدن فاز A و B بدست آورد.

$$V_{s-c} = V_{cAB/C} \quad (۴)$$

$V_{cAB/C}$ ولتاژ کوپلینگ ایجاد شده در سمت خط کلید در فاز C بر اثر بسته شدن فازهای A و B می باشد. دامنه $V_{cAB/C}$ بر حسب پریونیت برابر با V_{cAB/C_pu} می باشد که با استفاده از اطلاعات قبلی شبکه اندازه گیری شده و در جداولی ثبت شده است و فاز $V_{cAB/C}$ برابر با $\varphi_{AB/C}$ می باشد که بر مبنای رابطه (پ-۸) محاسبه می شود. با پریونیت کردن متغیرهای معادله (۴)، معادله (۵) به صورت زیر به دست می آید.

$$\sin(\omega t + \varphi_C) = V_{cAB/C_pu} \sin(\omega t + \varphi_{AB/C}) \quad (۵)$$

با بدست آمدن مقدار φ_C (مطابق با روابط (پ-۵) در لحظه ارسال فرمان وصل به کلید) و جایگذاری در معادله (۵)، زمان های t_1 تا t_4 مطابق با معادلات (پ-۹) بدست می آیند. با اعمال شرط مثبت بودن، زمان تاخیر TD_C از میان زمان های t_1 تا t_4 انتخاب می شود. (هر کدام که مثبت و مقدار کمتری داشته باشد).

بنابراین مقادیر تاخیر برای هر سه فاز در لحظه ارسال فرمان وصل توسط اپراتور، محاسبه شده اند و پس از گذشت زمان تاخیر برای هر فاز (نسبت به مرجع زمانی همه آنها که لحظه ارسال فرمان وصل توسط اپراتور است)، دستور وصل به آن فاز ارسال می شود.

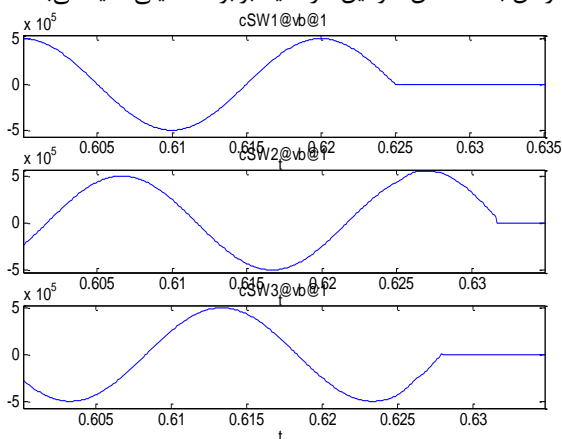
۴- نتایج شبیه سازی

الگوریتم پیشنهادی برای بستن کلید سه فاز خطوط انتقال جبران سازی نشده برای وضعیت های مختلف به کار گرفته شده است و در هر وضعیت، خروجی الگوریتم ارائه شده و الگوریتم دستگاه F_{236} و روش تاخیر تطبیقی مطابق با مرجع [۴]، با حالتی که کلید بصورت تصادفی بسته شود، مقایسه شده اند.

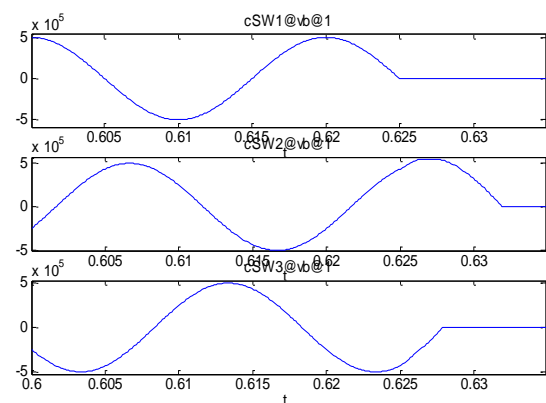
برای شبیه سازی الگوریتم مرجع [۴] از الگوریتم شبیه ساز عملکرد دستگاه F_{236} استفاده شده است و با توجه به توالی زمانی بهینه برای بستن فازها مطابق با مرجع [۴]، مقادیر ثابتی با تاخیر نهایی الگوریتم دستگاه F_{236} جمع یا کسر می شوند. توالی بسته شدن فازها طبق مرجع [۴]، همواره ACB در نظر گرفته می شود. مطابق با مرجع [۴]، با در نظر گرفتن زمان بهینه بستن فاز A به عنوان مرجع زمانی (زمان صفر)، زمان بهینه بسته شدن فاز C و B (بر حسب میلی ثانیه) برای خط جبران سازی نشده مطابق با جدول ۱ به دست می آید. (توجه شود که در استفاده از الگوریتم دستگاه F_{236} برای شبیه سازی الگوریتم مرجع [۴] توالی بستن فازها بصورت ACB تنظیم می شود. مطابق با

فازهای A و B و C به ترتیب برابر صفر و 0.12 pu و صفر (به ترتیب معادل اختلاف های صفر و 0.3 میلی ثانیه و صفر از لحظه بهینه بستن هر فاز کلید) و فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن هر سه فاز کلید، برابر 32.7 میلی ثانیه می باشد. (در صورتی که اختلاف زمان بسته شدن از زمان بهینه بستن کمتر از 1 نمونه باشد، مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن برابر صفر در نظر گرفته می شود).

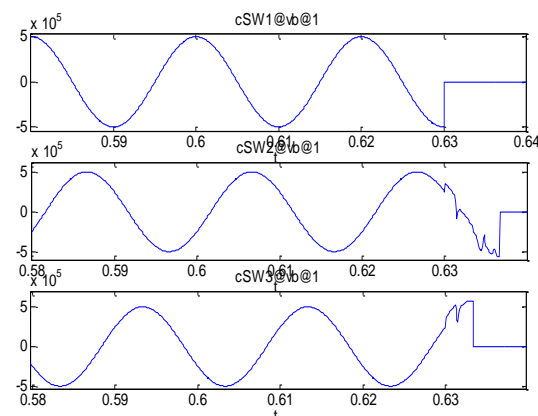
❖ در مرحله بعد برای بستن کلید خط انتقال از الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. ولتاژ دو سر کلید در شکل ۶ آمده است. با بزرگ نمایی در شکل ۶ مشاهده می شود که اختلاف زمان بسته شدن کلید از زمان بهینه بستن کلید (صفر ولتاژ دو سر کلید) در هر سه فاز کمتر از یک نمونه (فرکانس نمونه برداری 10 کیلو هرتز است) و یا به عبارتی کمتر از 0.1 میلی ثانیه است. در این وضعیت، مطابق با شکل ۶، مقدار ولتاژ کلید در لحظه بسته شدن برای هر سه فاز برابر صفر (معادل با اختلاف زمانی صفر از لحظه بهینه بستن کلید) و فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن سومین فاز کلید برابر 33 میلی ثانیه می باشد.



شکل (۵): ولتاژ دو سر کلید ابتدای خط انتقال غیر ترانسپوز با طول ۱۹۶ کیلومتر در صورت بستن کلید سه فاز با استفاده از روش تاخیر تطبیقی مطابق با مرجع [۴]

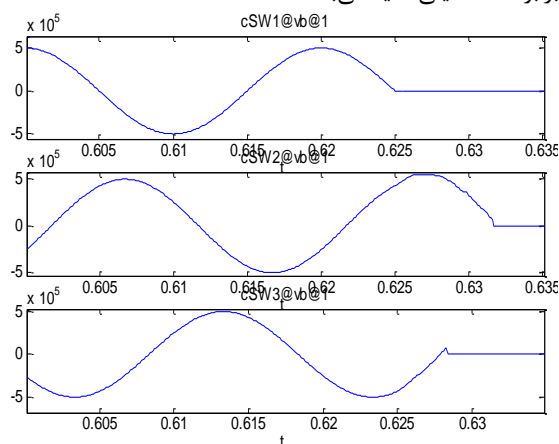


شکل (۶): ولتاژ دو سر کلید سه فاز ابتدای خط انتقال غیر ترانسپوز با طول ۱۹۶ کیلومتر در صورت بستن کلید سه فاز با استفاده از الگوریتم پیشنهادی



شکل (۳): ولتاژ دو سر کلید سه فاز ابتدای خط انتقال غیر ترانسپوز با طول ۱۹۶ کیلومتر در صورت بستن کلید سه فاز بصورت تصادفی

❖ در مرحله بعدی برای بستن کلید خط انتقال از الگوریتم شبیه ساز عملکرد دستگاه F_{236} استفاده شده است. ولتاژ دو سر کلید در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با شکل مذکور، در این وضعیت (الگوریتم F_{236}) مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن، برای فازهای A و B و C، به ترتیب برابر صفر و 0.126 pu و 0.148 pu (به ترتیب معادل اختلاف های صفر و 0.4 میلی ثانیه و 0.4 میلی ثانیه از لحظه بهینه بستن هر فاز کلید) و فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن هر سه فاز کلید برابر 32.7 میلی ثانیه می باشد.

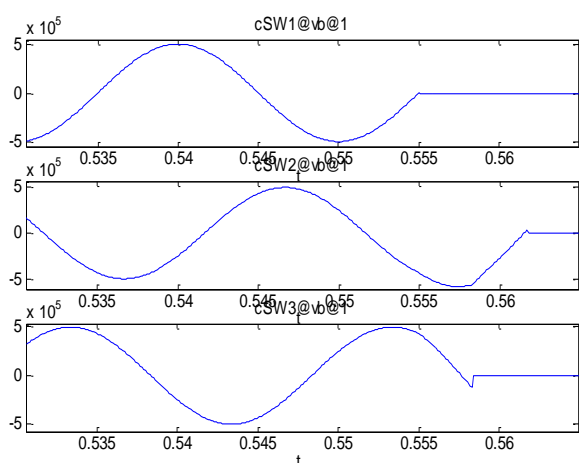


شکل (۴): ولتاژ دو سر کلید سه فاز ابتدای خط انتقال غیر ترانسپوز با طول ۱۹۶ کیلومتر در صورت بستن کلید سه فاز با استفاده از الگوریتم F_{236}

❖ در مرحله بعدی برای بستن کلید خط انتقال از روش تاخیر تطبیقی مطابق با مرجع [۴] استفاده شده است. در این حالت، فازهای A و C مطابق با الگوریتم دستگاه F_{236} بسته شده است و با توجه به جدول ۱، ثابت 0.4 میلی ثانیه ای از مقدار تاخیر خروجی F_{236} برای فاز C، کسر شده است. (البته باید توجه شود که دستگاه F_{236} طوری تنظیم شده است که توالی بسته شدن فازها بصورت ACB باشد). مطابق با شکل ۵، توالی بسته شدن فازها بصورت ACB و مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن برای

در این وضعیت مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن برای فازهای A و B و C به ترتیب برابر $1/1 \text{ pu}$ و $0/63 \text{ pu}$ و $1/2 \text{ pu}$ (به ترتیب معادل اختلاف های $5/1$ میلی ثانیه و 4 میلی ثانیه و $4/2$ میلی ثانیه از لحظه بهینه بستن هر فاز کلید) و فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن هر سه فاز کلید برابر $47/5$ میلی ثانیه می باشد.

- در مرحله بعدی برای بستن کلید خط انتقال از الگوریتم شبیه ساز عملکرد دستگاه F_{236} استفاده شده است. ولتاژ دو سر کلید در شکل ۸ نشان داده شده است. در این وضعیت، مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن برای فازهای A و B و C به ترتیب برابر صفر و صفر و $0/25 \text{ pu}$ (به ترتیب معادل اختلاف های صفر و صفر و $0/8$ میلی ثانیه از لحظه بهینه بستن هر فاز کلید) و فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن هر سه فاز کلید برابر $42/7$ میلی ثانیه می باشد.



شکل (۸): ولتاژ دو سر کلید سه فاز ابتدای خط انتقال غیر ترانسپوز با طول 510 کیلومتر در صورت بستن کلید سه فاز با استفاده از الگوریتم F_{236}

- در مرحله بعدی برای بستن کلید خط انتقال از روش تاخیر تطبیقی مطابق با منبع [۴] استفاده شده است. (در شبیه سازی صورت گرفته، دستگاه F_{236} طوری تنظیم شده است که توالی بسته شدن فازها بصورت ACB باشد. فاز A مطابق با الگوریتم دستگاه F_{236} بسته شده است و با توجه به جدول ۱ و اینکه طول خط از 500 کیلومتر بیشتر است، ثابت $0/8$ میلی ثانیه ای از مقدار تاخیر خروجی F_{236} برای فاز C و ثابت $0/4$ میلی ثانیه ای از مقدار تاخیر خروجی F_{236} برای فاز B، کسر شده است). ولتاژ دو سر کلید در شکل ۹ به نمایش درآمده است. در این وضعیت توالی بسته شدن فازها بصورت ACB می باشد و مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن برای فازهای A و B و C به ترتیب برابر صفر و $0/138 \text{ pu}$ و $0/079 \text{ pu}$ (به ترتیب معادل اختلاف های صفر و $0/5$ میلی ثانیه و $0/2$ میلی ثانیه از لحظه بهینه بستن هر فاز کلید) و

در جدول ۲ مقادیر ماکزیمم ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن (از میان مقادیر بدست آمده برای هر فاز) و فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن سومین فاز کلید، برای مراحل قبلی آورده شده است.

با تغییر دادن زمان های باز شدن فازهای کلید سه فاز ابتدای خط در وضعیت مذکور، خطای کمتر از 1 نمونه برای الگوریتم پیشنهادی و خطای حداکثر 3 نمونه برای روش مرجع [۴] مشاهده شد. دقت 100 درصدی الگوریتم ارائه شده در بدست آوردن زمان بهینه بسته شدن، با محدودتر کردن بازه برقراری جریان، باعث کاهش ولتاژ قبل از برقراری جریان و کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از بستن کلید می شود.

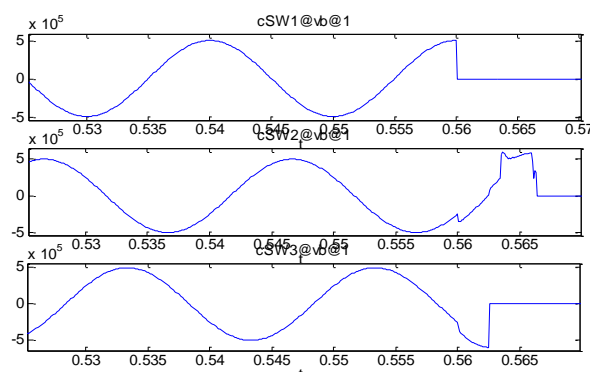
جدول (۲): مقایسه عملکرد الگوریتم های مختلف برای بستن سنکرون خط انتقال غیر ترانسپوز با طول 196 کیلومتر

ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن (pu)	اختلاف از زمان بهینه بستن کلید (ms)	فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا بسته شدن هر سه فاز (ms)	
$1/16$	5	$37/7$	بستن تصادفی کلید
$0/148$	$0/4$	$32/7$	الگوریتم F_{236}
$0/124$	$0/3$	$32/7$	روش تاخیر تطبیقی مطابق با مرجع [۴]
صفر	صفر	33	الگوریتم ارائه شده در مقاله

(۲) خط غیر ترانسپوز با طول 510 کیلومتر و انتهای باز

خط انتقالی با طول 510 کیلومتر و غیر ترانسپوز که جبران سازی نشده است مطابق با داده های ورودی خط انتقال انجیرک-رودشور شبیه سازی شده است. در ابتدای این خط انتقال تک مداره منبعی با دامنه ولتاژ 500 کیلو ولت و انتهای این خط انتقال باز است.

- در مرحله اول کلید سه فاز خط انتقال مذکور بصورت تصادفی بسته می شود. (زمان بسته شدن کلید طوری تنظیم شده است که کلید در بدترین حالت بسته شود). ولتاژ دو سر کلید در شکل ۷ آمده است.



شکل (۷): ولتاژ دو سر کلید سه فاز ابتدای خط انتقال غیر ترانسپوز با طول 510 کیلومتر در صورت بستن کلید سه فاز بصورت تصادفی

ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن هر سه فاز کلید برای مراحل قبلی آورده شده است.

جدول (۳): مقایسه عملکرد الگوریتم های مختلف الگوریتم های مختلف برای بستن سنکرون کلید خط انتقال غیر ترانسپوز با طول ۵۱۰ کیلومتر

فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا بسته شدن هر سه فاز (ms)	اختلاف از زمان بهینه بستن کلید (ms)	ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن (pu)	
۴۷/۵	۵/۱	۱/۲	بستن تصادفی کلید
۴۲/۷	۰/۸	۰/۲۵	الگوریتم F236
۴۲/۶	۰/۵	۰/۱۳۸	روش تاخیر تطبیقی مطابق با مرجع [۴]
۴۳	۰/۲	۰/۰۹۰	الگوریتم ارائه شده در مقاله

۵- نتیجه گیری

با توجه به اینکه در حالت کلی در کلید زنی خط انتقال جبران سازی نشده، ولتاژ کوپلینگ قابل صرف نظر کردن نیست، نیاز است برای بستن کلید در نقطه بهینه، ولتاژ کوپلینگ با توجه به مقادیر زمان های تاخیر مکانیکی هر فاز، در نظر گرفته شود. الگوریتم ارائه شده با جبران سازی اثر ولتاژ کوپلینگ، قادر است بسته شدن سنکرون کلید خط انتقال جبران سازی نشده با انتهای باز را برای تمامی حالاتی که ممکن است ایجاد شود، با خطای حداکثر ۳ نمونه (با توجه به فرکانس نمونه برداری) کنترل کند و همچنین با بدست آوردن مقادیر تاخیر (در ارسال فرمان) برای هر فاز در لحظه ارسال فرمان وصل، زمان بی برقی فازها را به حداقل مقدار ممکن کاهش دهد. با توجه به پایه محاسباتی الگوریتم و عدم وابستگی آن به مواردی چون پیکر بندی خط انتقال (ترانسپوز بودن) و طول خط و مقدار ولتاژ منبع و ورودی های در دسترس (ولتاژ یک فاز منبع و ولتاژ سمت خط برای هر سه فاز، می توان در دستگاه های کلید زنی سنکرون با ورودی های مشابه از الگوریتم مذکور استفاده کرد.

پیوست

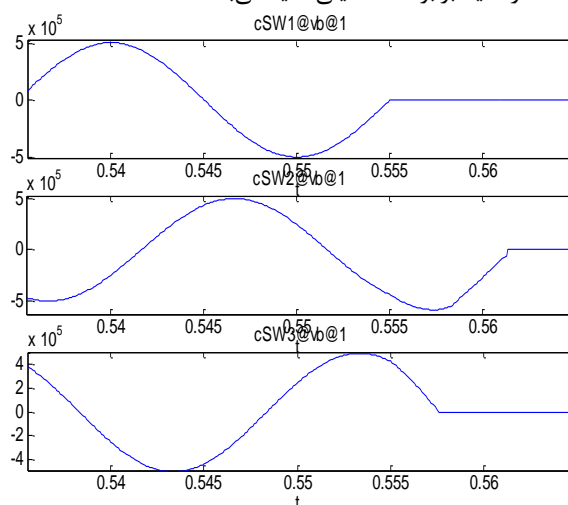
برخی از معادلات ریاضی استفاده شده و قسمت هایی از الگوریتم های طراحی شده در این مقاله در این بخش آورده شده اند.

$$\text{If } (VP > 0) \rightarrow t_A = (1/\omega) [\pi - \sin^{-1}(|VA|/VM)]$$

$$\text{If } (VP < 0) \rightarrow t_A = (1/\omega) [\sin^{-1}(|VA|/VM)] \quad (پ-۱)$$

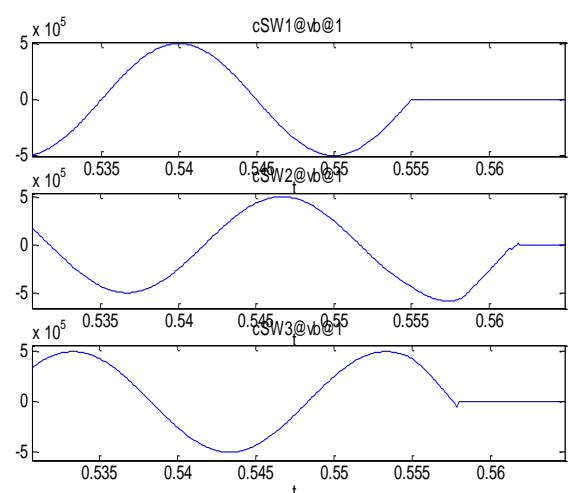
در معادله بالا VM برابر با دامنه ولتاژ منبع سه فاز علامت | | نمایانگر عملگر قدر مطلق می باشد. مقادیر t_B و t_C نیز مانند t_A محاسبه می شوند.

فاصله زمانی از لحظه ارسال فرمان وصل تا زمان بسته شدن هر سه فاز کلید برابر ۴۲/۶ میلی ثانیه می باشد.



شکل (۹): ولتاژ دو سر کلید سه فاز ابتدای خط انتقال غیر ترانسپوز با طول ۵۱۰ کیلومتر در صورت بستن کلید سه فاز با استفاده از روش تاخیر تطبیقی مطابق با مرجع [۴]

- در مرحله آخر برای بستن کلید خط انتقال از الگوریتم پیشنهادی در این مقاله استفاده شده است. ولتاژ دو سر کلید در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این وضعیت (الگوریتم پیشنهادی) مقدار ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن برای فازهای A و B و C به ترتیب برابر صفر و صفر و ۰/۰۹۰ pu (به ترتیب معادل اختلاف های صفر و صفر و ۰/۲ میلی ثانیه از لحظه بهینه بستن هر فاز مقادیر بدست آمده، حداکثر اختلاف از زمان بهینه بستن کلید در این وضعیت برابر ۲ نمونه می باشد.



شکل (۱۰): ولتاژ دو سر کلید سه فاز ابتدای خط انتقال غیر ترانسپوز با طول ۵۱۰ کیلومتر در صورت بستن کلید با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

در جدول ۳ مقادیر ماکزیمم ولتاژ دو سر کلید در لحظه بسته شدن (از میان مقادیر بدست آمده برای هر فاز) و فاصله زمانی از لحظه

$$\begin{aligned} TO_B &= TM_B + TD_{Bc} \\ TO_C &= TM_C + TD_{Cc} \end{aligned} \quad (\text{پ-۷})$$

$$\varphi_{AB/C} = \tan^{-1} \left[\frac{C_{AC} \sin(\varphi_A) + C_{BC} \sin(\varphi_B)}{C_{AC} \cos(\varphi_A) + C_{BC} \cos(\varphi_B)} \right] \quad (\text{پ-۸})$$

فرض شده است که مقادیر خازن های بین فازها در خط مورد نظر (خط انتقال سه فاز تک مداره) موجود باشند.

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\varphi_C) - V_{cAB/C-pu} \sin(\varphi_{AB/C})}{V_{cAB/C-pu} \cos(\varphi_{AB/C}) - \cos(\varphi_C)} \right] \\ t_2 &= \frac{1}{\omega} \left[\pi + \tan^{-1} \left[\frac{\sin(\varphi_C) - V_{cAB/C-pu} \sin(\varphi_{AB/C})}{V_{cAB/C-pu} \cos(\varphi_{AB/C}) - \cos(\varphi_C)} \right] \right] \\ t_3 &= t_2 + 20ms \\ t_4 &= t_3 + 20ms \end{aligned} \quad (\text{پ-۹})$$

مراجع

- [1] U. Samitz, H. Siguerdidjane, F. Boudaoud, P. Bastard, J. P. Dupraz, M. Collet, J. Martin, and T. Jung, "On controlled switching of high voltage unloaded transmission lines", *Elektrotechnik und Informations technik* 119, vol. 25, no. 12, pp. 415-421, 2002.
- [2] P. Stroica, "Modern methods for synchronous switching of circuit-breakers in 400 kV substations of the Romanian power system", *Electrotechnical Conference, MELECON, 10th Mediterranean*, vol. 3, pp. 949-953, 2000.
- [3] ABB, Controlled Switching. "Buyer's & Application Guide", 2009.
- [4] M. A. Atefi, M. Sanaye-Pasand, "Improving controlled closing to reduce transients in HV transmission lines and circuit breakers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 733-741, 2013.
- [5] R. P. Vasant, H. Singh, M. Tech, I. E. T. Alwar. "Controlled Switching of High Voltage SF6 Circuit breaker", *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 3, Issue 5, 2015.
- [6] D. Goldsworthy, T. Roseburg, D. Tziouvaras, J. Pope, "Controlled switching of HVAC circuit breakers: Application examples and benefits", *Protective Relay Engineers, 61st Annual Conference*, pp. 520-535, IEEE, 2008.
- [7] K. M. Dantas, D. Fernandes, L. A. Neves, B. A. Souza, L. C. Fonseca, "Mitigation of switching overvoltages in transmission lines via controlled switching", *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, pp. 1-8, 2008.
- [8] H. Ito, "Controlled switching technologies, state-of-the-art", *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific, IEEE/PES*, vol. 2, pp. 1455-1460, 2002.
- [9]

^۱ باقی ماندن Trapped voltage در طرف خط انتقال از کلیدی که قرار است بسته

$$TDA = \left(\left[\frac{TM_A + TA_A - t_A}{10} \right] + 1 \right) \times 10 - (TM_A + TA_A - t_A) \quad (\text{پ-۲})$$

$$TDB = \left(\left[\frac{TM_B + TA_B - t_B}{10} \right] + 1 \right) \times 10 - (TM_B + TA_B - t_B)$$

$$TDC = \left(\left[\frac{TM_C + TA_C - t_C}{10} \right] + 1 \right) \times 10 - (TM_C + TA_C - t_C)$$

علامت [] در این معادلات، عملگر جداکننده عدد صحیح است. در شرایط فرض شده در این مقاله، مقدار TA مطابق با رابطه فوق صفر در نظر گرفته می شود.

$$\begin{aligned} TO_A &= TM_A + TD_A \\ TO_B &= TM_B + TD_B \\ TO_C &= TM_C + TD_C \end{aligned} \quad (\text{پ-۳})$$

$$n1_A = \left[\frac{TM_A}{20} \right] + 1 \quad (\text{پ-۴})$$

$$n1_B = \left[\frac{TM_B}{20} \right] + 1$$

$$n1_C = \left[\frac{TM_C}{20} \right] + 1$$

علامت [] در معادله فوق هم عملگر جداکننده عدد صحیح است.

$$\text{If } ((VF_A > 0) \wedge (VP_A > 0)) \rightarrow \varphi_A = \sin^{-1}(VF/VM)$$

$$\text{If } ((VF_A > 0) \wedge (VP_A < 0)) \rightarrow \varphi_A = \pi - \sin^{-1}(VF/VM)$$

(پ-۵)

$$\text{If } ((VF_A < 0) \wedge (VP_A > 0)) \rightarrow \varphi_A = 2\pi - \sin^{-1}(|VF|/VM)$$

$$\text{If } ((VF_A < 0) \wedge (VP_A < 0)) \rightarrow \varphi_A = \pi + \sin^{-1}(|VF|/VM)$$

معادلات فوق برای فاز A می باشند. مقادیر φ_B و φ_C نیز مانند φ_A محاسبه می شوند.

$$\begin{aligned} t_{1B} &= \frac{\tan^{-1} \left[\frac{\frac{\sqrt{3}}{2} V_{cA/B-pu}}{1 + \frac{V_{cA/B-pu}}{2}} \right] - \varphi_B}{\omega} \\ t_{2B} &= \frac{\pi - \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\sqrt{3}}{2} V_{cA/B-pu}}{1 + \frac{V_{cA/B-pu}}{2}} \right] - \varphi_B}{\omega} \\ t_{3B} &= t_{1B} + 20ms \\ t_{4B} &= t_{2B} + 20ms \end{aligned} \quad (\text{پ-۶})$$

مقادیر فوق برای فاز C نیز مانند فاز B محاسبه می شوند.

شود، بستگی به تجهیزات متصل به خط دارد.

^۲ در روش های سنتی بستن کلید خط انتقال، توالی بسته شدن فازها ACB فرض می شود و زمان صفر شدن فاز A به عنوان مرجع زمان بسته شدن کلید مقدار صفر دارد و زمان بستن فاز C، $3/3$ میلی ثانیه و برای فاز B، $6/6$ میلی ثانیه می باشد.

^۳ مثلاً می توان فرض کرد که در سمت خط هر فاز کلید برای اندازه گیری ولتاژ از IVT (ترانسفورماتور ولتاژ اندوکتانسی) استفاده شده است که باعث از بین رفتن ولتاژ باقیمانده می شود.

^۴ البته باید توجه داشت که دقت ۱۰۰ درصدی از دید محاسبه زمان بسته شدن بهینه بدست آمده است و در عمل به دلیل خطای تصادفی مکانیکی کلید، فازها با اختلافی تصادفی در بازه ای با دامنه پراکندگی مکانیکی کلید حول زمان بهینه محاسبه شده بسته می شوند.

