تأثیر مشخصه‌های انواع مختلف افت ولتاژهای نامتقارن بر گشتاور گذرای موتور سنکرون

جابر علی‌پور[۱] عارف درودی[۲] مرتضی قاسمی‌نژاد[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد- تهران- ایران
alipoor@shahed.ac.ir
۲- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد- تهران- ایران
doroudi@shahed.ac.ir
۳- دانشجوی دکتری- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد- تهران- ایران
mghaseminejad@shahed.ac.ir

چکیده: **افت (فلش) ولتاژ یکی از پدیده‌های مبحث کیفیت برق به شمار می‌رود و تاثیر آن روی تجهیزات الکتریکی بسیار مورد توجه است. مهمترین اثر فلش ولتاژ روی ماشین‌های دوار، نوسانات گشتاور الکترومکانیکی در حین و بعد از فلش است. در این مقاله، با استفاده از یک تئوری ساده به‌نام تحلیل مسیر شار استاتور، چگونگی تولید این نوسانات گشتاور و نیز تأثیر مشخصات فلش‌ها روی شدت نوسانات، بررسی شده‌است. همچنین، مشخصات فلش‌هایی که شدیدترین اثرات را دارند، مشخص شده‌اند. این مشخصات شامل دامنه فلش، طول دوره آن و فاز ولتاژ هنگام وقوع فلش هستند. برای بررسی صحت تئوری ادعا شده، یک موتور سنکرون نمونه شبیه‌سازی شده و با اعمال انواع فلش به آن، نتایج از نظر تحلیل مسیر شار و مشخصات فلش‌های بحرانی، با تئوری ارائه شده مقایسه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی، صحت تئوری مطرح شده را تأیید می‌کند.**

کلمات کلیدی: **کیفیت توان، فلش ولتاژ، موتور سنکرون، مسیر شار استاتور، نوسانات گشتاور**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۱۲/۵
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۰۱/۲۵
نام نویسنده‌ی مسئول : جابر علی‌پور
نشانی نویسنده‌ی مسئول :
Ise Laboratory, Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1, Yamada-oka Suita, Osaka JAPAN,
Postal code: 565-0871.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

۱- مقدمه

امروزه توجه شرکت های برق و مشترکین آنها اعم از صنعتی ،خانگی و تجاری به شکل روزافزونی به مسئله کیفیت توان یا کیفیت انرژی الکتریکی معطوف شده است [۳-۱]. فلش-های ولتاژ یکی از پدیده‌های کیفیت توان هستند که به صورت افت ۱۰ تا ۹۰ درصدی در مقدار موثر ولتاژ تغذیه تعریف می-شوند و از نیم سیکل فرکانس تغذیه تا یک دقیقه طول می‌کشند [۶-۴]. دلایل وقوع فلش‌های ولتاژ راه‌اندازی بارهای بزرگ و خطاها در سیستم قدرت هستند [۱۱-۷]. در مورد فلش‌های ناشی از خطاها به طور خلاصه می‌توان گفت، وقتی خطایی روی یک خط رخ می‌دهد، مصرف کننده‌های روی فیدرهایی که از باس مشترک با خط خطازده تغذیه می‌شوند، فلش را تجربه می-کنند.

اگر ماشینهای الکتریکی در معرض فلش ولتاژ قرار گیرند، ممکن است پالس‌های گشتاور شدیدی ایجاد شود [۱۳-۱۱]. این نوسانات گشتاور می‌توانند به ماشین و تجهیزات متصل به آن آسیب برساند. در مورد ماشین‌های سنکرون حتی خروج از گام ماشین نیز محتمل است. در چنین شرایطی، سیستم حفاظتی ماشین باید به موقع فرمان قطع آن را از تغذیه صادر کند. از طرف دیگر، گاهی پیوستگی فرایند متصل به ماشین بسیار مهم بوده و وقفه‌ای کوتاه مدت در فرآیند تولید، می‌تواند هزینه‌ای در حد تعمیر یا تعویض تجهیزات به سیستم تحمیل کند. بنابراین لازم است تا با ارزیابی شدت نوسانات گشتاور ناشی از فلش‌ها، فلش‌هایی که ماشین می‌تواند به سلامت از آنها عبور کند شناسایی شده و با تنظیم صحیح سیستم حفاظتی از قطعی‌های غیرضروری جلوگیری شود.

در مطالعات قبلی اثر دامنه و طول مدت فلش‌های متقارن بر نوسانات گشتاور موتورهای سنکرون بررسی شده‌است [۱۱]. در این مقاله ابتدا با استفاده از روشی تحلیلی به نام "مسیر شار استاتور"، چگونگی به وجود آمدن نوسانات گشتاور در حین و بعد از انواع مختلف فلش ولتاژ (متقارن و نامتقارن) توجیه می‌گردد. در این روش، تغییرات شار استاتور در دستگاه دو محوری و در صفحه مختلط دنبال شده و از آنجا که تغییرات گشتاور منطبق بر تغییرات شار است، دامنه نوسانات گشتاور مورد تخمین قرار می‌گیرد. همچنین تأثیر دامنه و طول مدت فلش و نیز فاز ولتاژ در لحظه وقوع فلش بر شدت نوسانات گشتاور الکترومکانیکی در حین و بعد از وقوع فلش ولتاژ، برای انواع فلش‌ها مشخص می‌شود. بدین ترتیب مشخصات فلش‌های بحرانی قابل تعیین است.

این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده‌است. در بخش ۲ فلش-های ولتاژ و دسته‌بندی آنها مختصراً معرفی شده و معادلات کلی آنها در دستگاه دومحوری برای اعمال به روابط ماشین‌های الکتریکی، محاسبه می‌شوند. در بخش ۳، با روش تحلیل مسیر شار استاتور، اثر انواع مختلف فلش ولتاژ بر نوسانات گشتاور موتورهای سنکرون بررسی می‌گردد. در بخش ۴ نتایج شبیه-سازی کامپیوتری برای تأیید تئوری مطرح شده، ارائه و در بخش ۵ نتیجه‌گیری از مقاله بیان می‌شود.

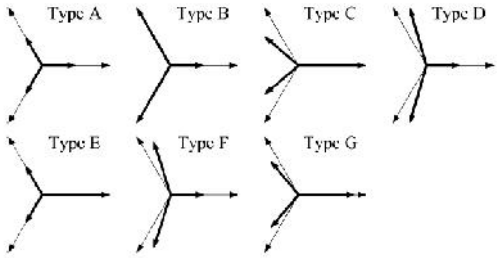
۲- فلش‌های ولتاژ و دسته‌بندی آنها

فلش‌های ولتاژ می‌توانند متقارن یا نامتقارن باشند. اگر دامنه ولتاژ فازها یکسان و 120° اختلاف فاز داشته باشند، فلش متقارن است. اتصال کوتاه سه‌فاز عامل ایجاد این نوع فلش است. خطاهای تکفاز به زمین، فاز به فاز و دوفاز به زمین فلش‌های نامتقارن را ایجاد می‌کنند. فلش‌های نامتقارن بسته به تفاوت در اندازه ولتاژ فازها و یا زاویه بین آنها، به انواع مختلفی تقسیم می-شوند. شکل اتصال بارها و ترانسفورماتورها (ستاره و مثلث) می-تواند نوع فلشی که بار احساس می‌کند را تغییر دهد.

برای فلش‌های ولتاژ مشخصه‌هایی تعریف می‌شود که شدت تأثیر فلش بر تجهیزات، به این مشخصه‌ها بستگی دارد. مهمترین مشخصه‌های فلش‌ها، دامنه و طول مدت آنها هستند [۹-۸]. برای فلش‌های متقارن، دامنه فلش، مقدار مؤثر ولتاژ باقیمانده به درصد یا پریونیت است که با S نشان داده می‌شود. برای فلش-های نامتقارن، S ضریبی است که در روابط ولتاژ ظاهر می‌شود و باعث تفاوت در دامنه ولتاژ فازها و یا زاویه بین آنها می‌شود. طول مدت فلش، فاصله زمانی بین شروع و پایان فلش است. مشخصات دیگر فلش‌ها که می‌توانند بر تجهیزات تأثیر بگذارند، فاز ولتاژ در لحظه شروع فلش و پرش فاز ولتاژ می‌باشد. در این مقاله، شکل فلش ولتاژ به صورت مستطیلی درنظر گرفته شده و همچنین فرض می‌شود که پرش فاز [۱۴] و تغییر نوع فلش هنگام رفع خطا [۱۵] نخواهیم داشت.

مرجع [۱۴] فلشهای ولتاژ را به هفت نوع تقسیم‌بندی نموده‌است. شکل ۱ دیاگرام فازوری ولتاژها را برای این نوع دسته‌بندی در $S=0/5$ ، نشان می‌دهد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016



شکل (۱): دیاگرام فازوری انواع مختلف فلش ولتاژ برای s=۰/۵.

با توجه به اینکه مدل ماشین‌های سنکرون عمدتاً در دستگاه دو محوری d و q بیان می‌گردد، لذا برای اعمال انواع فلش ولتاژ به این مدل، معادلات ولتاژی انواع فلش می‌بایستی در دستگاه دومحوری و با استفاده از تبدیل Park [16]، محاسبه گردد. فرض می‌شود که در لحظه وقوع فلش، معادله ولتاژ فاز a به صورت زیر باشد:

$$v_a(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_0) \qquad (۱)$$

ولتاژ در دو فاز دیگر ۱۲۰° با فاز a اختلاف خواهد داشت. θ_0 به عنوان فاز ولتاژ در لحظه وقوع فلش، بر شدت نوسانات گشتاور تأثیر خواهد داشت، لذا در معادلات مربوط به فلش‌ها وارد شده‌است. رابطه فلش ولتاژ متقارن بعد از انتقال به دستگاه دو محوری چنین است:

$$Type\ \mathrm{A}\begin{cases} v_q(t) = sV_m \cos\theta_0 \\ v_d(t) = -sV_m \sin\theta_0 \\ v_0(t) = 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

و برای فلش‌های نامتقارن داریم:

(۳)

$$\begin{cases} v_q(t) = \dfrac{V_m}{3} X(s)\cos\theta_0 \cos 2\omega t \\ \qquad + \dfrac{V_m}{3} X(s)(-\sin\theta_0)\sin 2\omega t + \dfrac{V_m}{3} Y(s)\cos\theta_0 \\ v_d(t) = \dfrac{V_m}{3} X(s)\cos\theta_0 \sin 2\omega t \\ \qquad + \dfrac{V_m}{3} X(s)\sin\theta_0 \cos 2\omega t + \dfrac{V_m}{3} Y(s)(-\sin\theta_0) \\ v_0(t) = \dfrac{V_m}{3} Z(s)\cos(\omega t + \theta_0) \end{cases}$$

که $X(s)$ و $Y(s)$ توابعی از s هستند و برای انواع فلش از روابط زیر بدست می‌آیند.

$$\text{Type B}\begin{cases} X(s) = s-1 \\ Y(s) = s+2 \\ Z(s) = s-1 \end{cases} \qquad (۴)$$

$$\text{Type C}\begin{cases} X(s) = \dfrac{3}{2}(1-s) \\ Y(s) = \dfrac{3}{2}(1+s) \\ Z(s) = 0 \end{cases} \qquad (۵)$$

$$\text{Type D}\begin{cases} X(s) = \dfrac{3}{2}(s-1) \\ Y(s) = \dfrac{3}{2}(s+1) \\ Z(s) = 0 \end{cases} \qquad (۶)$$

$$\text{Type E}\begin{cases} X(s) = 1-s \\ Y(s) = 1+2s \\ Z(s) = 1-s \end{cases} \qquad (۷)$$

$$\text{Type F}\begin{cases} X(s) = s-1 \\ Y(s) = 2s+1 \\ Z(s) = 0 \end{cases} \qquad (۸)$$

$$\text{Type G}\begin{cases} X(s) = 1-s \\ Y(s) = 1+2s \\ Z(s) = 0 \end{cases} \qquad (۹)$$

معادلات ولتاژها در دستگاه دو محوری نشان می‌دهد که برای فلش‌ها نامتقارن، جملات سینوسی با فرکانس دو برابر فرکانس تغذیه ظاهر می‌شوند. در ادامه خواهیم دید که ضرایب این جملات در نوسانات گشتاور تأثیرگذار خواهند بود.

۳- تحلیل تئوریک

در این بخش با استفاده از معادلات انواع فلش ولتاژ در دستگاه دو محوری، ابتدا تغییرات شار در صفحه مختلط بدست می‌آید. مسیر شار در صفحه مختلط بیانگر نوسانات شار در راستای محورهای d و q است. نوسانات شار عامل ایجاد نوسانات گشتاور هستند و هر چه دامنه این تغییرات بیشتر باشد، پالس‌های گشتاور شدیدتری را باعث خواهد شد. در ادامه با توجه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

به نحوه تغییرات شار استاتور و مسیر طی‌شده آن، بدترین وضعیت از لحاظ وقوع فلش ولتاژ تخمین زده می‌شود. در این تحلیل برای اینکه به معادلات صریحی برای شار استاتور برسیم، از مقاومت استاتور صرفنظر می‌شود. در شبیه‌سازی خواهیم دید که با درنظر گرفتن مقاومت استاتور نتایج با تئوری مطرح شده منطبق است. همچنین از آنجا که تحلیل مقایسه‌ای از شدت پیامدهای افت ولتاژهای مختلف با مشخصات متفاوت مدنظر است، از پدیده اشباع نیز صرفنظر شده است. بدیهی است که برای مدل واقعی ماشین، نوسانات شار باعث اشباع شدید می‌شود. مشخات بحرانی افت ولتاژها برای شار و گشتاور مدل بدون اشباع، درمورد شدت اشباع و پیامدهای جریان آن نیز معتبر خواهد بود. از آنجا که شکل کلی معادلات ولتاژ برای فلش متقارن با انواع نامتقارن متفاوت است، تحلیل به دو قسمت فلش‌های متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شود.

۳-۱- فلش‌های متقارن (نوع A)

. ولتاژ داخلی ماشین در حالت نرمال در قاب سنکرون برابر است با:

$$E_s = jV_m e^{j(\theta_0+\delta)} \quad (۱۰)$$

با ضرب جمله فوق در $e^{j(\omega t+\gamma)}$ معادله ولتاژ استاتور در قاب استاتور حاصل خواهد شد (γ اختلاف زاویه اولیه قاب سنکرون و استاتور است) :

$$E_s^s = jV_m e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)} e^{j\omega t} \quad (۱۱)$$

دامنه شار اولیه قبل از افت ولتاژ برابر است با:

$$\psi_{s0} = \frac{V_m}{\omega} \quad (۱۲)$$

فرض کنید در لحظه $t=0$ فلش ولتاژ رخ می‌دهد. در این لحظه موج ولتاژ دارای زاویه θ_0 است و معادلات شار اولیه در قاب سنکرون و استاتور به شکل زیر خواهد بود ($\omega t = 0$):

$$\psi_{s(t=0)} = \frac{V_m}{\omega} e^{j(\delta+\theta_0)} \quad (۱۳)$$

$$\psi_{s(t=0)}^s = \frac{V_m}{\omega} e^{j(\delta+\theta_0+\gamma)} \quad (۱۴)$$

و معادله ولتاژ در صفحه مختلط و در قاب مرجع استاتور برابر است با (ضریب s کاهش دامنه ولتاژ ناشی از فلش را نشان می‌دهد.):

$$E_s^s = jsV_m e^{j(\theta_0+\delta)} e^{j(\omega t+\gamma)} \quad (۱۵)$$

تغییرات شار با انتگرال‌گیری از موج ولتاژ بدست می‌آید:

$$\Delta\psi_{s(sag)}^s = \int_0^t E_s^s dt = \frac{sV_m}{\omega} e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)}(e^{j\omega t}-1) \quad (۱۶)$$

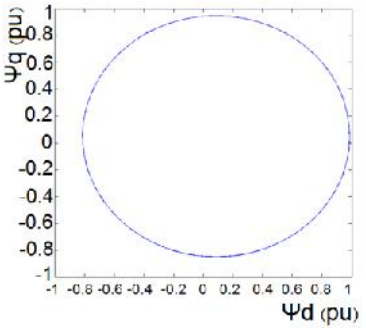
بردار شار منتجه با افزودن تغییرات به مقدار اولیه شار بدست می‌آید. نتیجه این کار معادله (۱۷) است.

$$\psi_{s(sag)}^s = \frac{V_m}{\omega} e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)}(1-s) + \frac{sV_m}{\omega} e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)} e^{j\omega t} \quad (۱۷)$$

برای محاسبه شار استاتور در مرجع سنکرون از رابطه $\psi_s = \psi_s^s e^{-j(\omega t+\gamma)}$ استفاده می‌شود:

$$\psi_{s(sag)} = \frac{V_m}{\omega} e^{j(\theta_0+\delta)}\left(s+(1-s)e^{-j\omega t}\right) \quad (۱۸)$$

رابطه (۱۸) متشکل از یک جمله ثابت و یک جمله دوار می‌باشد. جمله ثابت در پارامتر s ضرب شده‌است که نشان می‌دهد مقدار متوسط شار در اثر فلش ولتاژ کاهش یافته‌است. شکل ۲ مسیر شار را براساس رابطه (۱۸) به ازای $\theta_0 = 0$ برای فلشی که ۲ سیکل طول می‌کشد ($\omega t = 4\pi$) نشان می‌دهد.



شکل (۲): مسیر شار برای فلش ۱۰٪ نوع A با طول مدت ۲ سیکل.

مطابق شکل ۲، مسیر شار از نقطه (۰،۱) شروع شده و به ازای هرسیکل که فلش طول می‌کشد یک دور می‌زند. شعاع این دایره فاصله بین شار اولیه و شار در لحظه بی نهایت است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

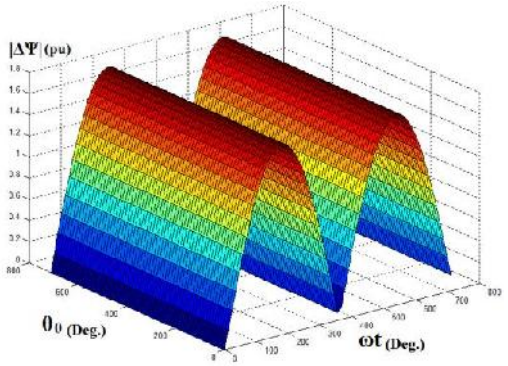
بنابراین این شعاع تنها و تنها به عمق فلش وابسته است $(1-s)$ و نه زاویه موج ولتاژ در لحظه شروع فلش. در طول فلش ولتاژ، شدت نوسانات گشتاور به این شعاع بستگی دارد. هرچه شعاع این دایره بیشتر باشد نوسانات گشتاور در حین فلش بیشتر خواهد بود. مطابق رابطه (۱۸)، شعاع دایره به s بستگی دارد و مستقل از θ_0 و δ است.

از آنجا که در معادلات اولیه ولتاژ شار از مقاومت استاتور صرف‌نظر شده‌است، اندازه جمله دوار (شعاع)، در رابطه (۱۸) ثابت بدست آمده‌است. اما در حقیقت این جمله کاهشی است.

جمله دوار، در راستای محورهای d و q نوسانات شار ایجاد می‌کند که به دنبال آن طبق روابط زیر، این نوسانات باعث تولید نوسانات گشتاور می‌شوند [۱۱]:

$$
\begin{aligned}
&T_e = \frac{3P}{4\omega_b}\left(\psi_d I_q - \psi_q I_d\right)\\
&I_q = \frac{-\psi_q}{L_q} \qquad I_d = \frac{-\psi_d}{L_d} + \frac{L_{md} I_{fd}}{L_d} \quad ,\\
&\psi_{df} = L_{md} I_{fd}\\
&\psi_d = \psi_s \cos\delta \qquad \psi_q = \psi_s \sin\delta\\
&T_e = \frac{3P}{4\omega_b}\left(\frac{\psi_s \psi_{df}}{L_d}\sin\delta + \psi_s^2\left(\frac{1}{L_q}-\frac{1}{L_d}\right)\sin 2\delta\right)
\end{aligned}
\qquad (۱۹)
$$

با کم کردن شار اولیه (رابطه ۱۳) از بردار شار در حین وقوع فلش (رابطه ۱۸)، بردار تغییرات شار حاصل می‌گردد. دامنه این بردار بر حسب تغییرات θ_0 (بیانگر نقطه شروع فلش) و ωt (بیانگر طول مدت فلش) در شکل ۳ ترسیم شده‌است. نقاطی که در آنها دامنه تغییرات شار (فاصله شار از مقدار حالت ماندگار خود) بیشینه باشد، حداکثر نوسانات گشتاور را هنگام بازگشت ولتاژ به حالت نرمال به وجود می‌آورد. مقادیر θ_0 و ωt که در آنها دامنه بردار تغییرات شار حداکثر می‌شود به عنوان مقادیر بحرانی در نظر گرفته می‌شوند.



شکل (۳): تغییرات دامنه شار هنگام بازگشت دامنه ولتاژ به ازای تغییرات زاویه اولیه ولتاژ و طول مدت فلش برای فلش نوع A.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، به ازای $\omega t = 2k\pi + \pi$، دامنه تغییرات بردار شار بیشترین مقدار را خواهد داشت. همچنین مشاهده می‌شود که برای فلش نوع A، θ_0 یعنی نقطه‌ای از موج ولتاژ که فلش اتفاق می‌افتد، تأثیری در اندازه تغییرات شار و در نتیجه نوسانات گشتاور ندارد.

وقتی دامنه ولتاژ به حالت عادی برمی‌گردد، شار در هر نقطه‌ای باشد، به سمت مقدار اولیه خود رجوع می‌کند. این بار نیز بازگشت شار به صورت دایره‌ای خواهد بود. هر چه فاصله شار در لحظه بازیافت دامنه ولتاژ از مقدار اولیه شار بیشتر باشد، شعاع دایره جدید بزرگتر و در نتیجه نوسانات گشتاور شدید خواهد بود. اگر طول فلش مضربی از دوره تناوب تغذیه باشد، یعنی وقتی در رابطه (۱۸)، $\omega t = 2k\pi$ باشد، شار در قاب استاتور برابر است با:

$$\psi_s^s = \frac{V_m}{\omega} e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)} \qquad (۲۰)$$

که برابر با شار در لحظه شروع فلش است. بنابراین در این حالت نوسانات گشتاور حداقل خواهد بود. از طرف دیگر، اگر طول فلش مضربی از تناوب اصلی به اضافه یک نیم پریود باشد خواهیم داشت:

$$\psi_s^s = \frac{V_m}{\omega}\left(1-2s\right)e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)} \qquad (۲۱)$$

وقتی دامنه ولتاژ برمی‌گردد معادله ولتاژ داخلی ماشین به شکل زیر است:

$$E_s^s = jV_m e^{j(\theta_0+\delta)} e^{j(\omega t+\gamma)} \qquad (۲۲)$$

و تغییرات شار برابر است با:

$$
\begin{aligned}
\Delta\psi_s^s &= \int_{t=\frac{\pi}{\omega}}^{t} E_s^s dt\\
&= \frac{V_m}{\omega} e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)}\left(e^{j\omega t}+1\right)
\end{aligned}
\qquad (۲۳)
$$

شار منتجه برابر است با:

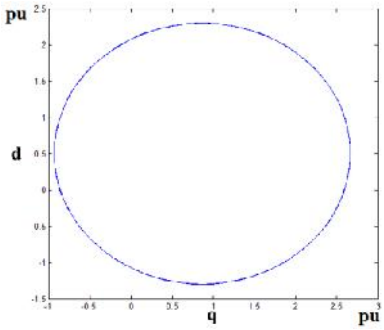
$$\psi_s^s = \frac{V_m}{\omega} e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)}\left(e^{j\omega t}+2\left(1-s\right)\right) \qquad (۲۴)$$

بعد از تبدیل به قاب سنکرون داریم :

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016

$$\psi_s = \frac{V_m}{\omega} e^{j(\theta_0+\delta)}\left(1+2(1-s)e^{-j\omega t}\right) \qquad (۲۵)$$

این معادله که مسیر بردار شار بعد از بازگشت دامنه ولتاژ به ازای طول فلش نیم سیکل را نشان می‌دهد، مشابه معادله (۱۸) دارای یک جمله ثابت و یک جمله دوار است که شعاع جمله دوار آن دو برابر شده‌است. بنابراین اگر طول فلش مضربی از دوره تناوب منبع به اضافه یک نیم سیکل باشد، شار در لحظه بازگشت ولتاژ بیشترین فاصله را از مقدار نرمال خود دارد، در نتیجه نوسانات گشتاور حداکثر خواهد بود. این معادله در صفحه مختلط در شکل ۴ رسم شده‌است. مشاهده می‌شود که دامنه تغییرات شار بسیار بزرگتر از حین وقوع فلش است.



شکل(۴): مسیر شار بعد از بازگشت دامنه ولتاژ پس از فلش۱۰٪ نوع A با طول مدت ۲/۵ سیکل.

۳-۲- فلش‌های نامتقارن

در این قسمت بحث تئوریک ارائه شده برای فلش‌های متقارن که در بخش قبلی به آن اشاره شد، برای فلش‌های نامتقارن تعمیم داده می‌شود. برای این کار و بر اساس روابط بدست آمده برای فلش‌های نامتقارن (رابطه ۳)، معادله ولتاژ ترمینال در دستگاه مختلط در قاب سنکرون چنین خواهد بود:

$$\begin{aligned} V_s &= V_d + jV_q \\ &= j\frac{V_m}{3}Y(s)e^{j\theta_0} + j\frac{V_m}{3}X(s)e^{-j\theta_0}e^{-j2\omega t} \end{aligned} \qquad (۲۶)$$

معادله ولتاژ استاتور برابر است با :

$$\begin{aligned} E_s &= j\frac{V_m}{3}Y(s)e^{j(\theta_0+\delta)} \\ &\quad + j\frac{V_m}{3}X(s)e^{j(-\theta_0+\delta)}e^{-j2\omega t} \end{aligned} \qquad (۲۷)$$

با ضرب رابطه فوق در $e^{j(\omega t+\gamma)}$، در قاب استاتور داریم :

$$\begin{aligned} E_s^s &= j\frac{V_m}{3}Y(s)e^{j(\theta_0+\delta+\omega t+\gamma)} \\ &\quad + j\frac{V_m}{3}X(s)e^{j(-\theta_0+\delta)}e^{-j(\omega t-\gamma)} \end{aligned} \qquad (۲۸)$$

با انتگرال‌گیری از ولتاژ استاتور، تغییرات شار ناشی از وقوع فلش ولتاژ به شکل زیر حاصل می شود :

$$\begin{aligned} \Delta\psi_s^s &= \int_0^t E_s^s dt = \frac{V_m}{3\omega}Y(s)e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)}(e^{j\omega t}-1) \\ &\quad -\frac{V_m}{3\omega}X(s)e^{-j(\theta_0-\delta-\gamma)}(e^{-j\omega t}-1) \end{aligned} \qquad (۲۹)$$

شار منتجه از مجموع شار اولیه و تغییرات شار بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} \psi_s^s &= \psi_{s0}^s + \Delta\psi_s^s = \frac{V_m}{\omega}e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)} \\ &\quad + \frac{V_m}{3\omega}Y(s)e^{j(\theta_0+\delta+\gamma)}(e^{j\omega t}-1) \\ &\quad -\frac{V_m}{3\omega}X(s)e^{-j(\theta_0-\delta-\gamma)}(e^{-j\omega t}-1) \end{aligned} \qquad (۳۰)$$

با ضرب رابطه فوق در $e^{-j(\omega t+\gamma)}$ در قاب سنکرون خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \psi_s &= \frac{V_m}{3\omega}Y(s)e^{j(\theta_0+\delta)} \\ &\quad + \frac{V_m}{3\omega}(3e^{j(\theta_0+\delta)} - Y(s)e^{j(\theta_0+\delta)} \\ &\quad + X(s)e^{-j(\theta_0-\delta)})e^{-j\omega t} \\ &\quad -\frac{V_m}{3\omega}X(s)e^{-j(\theta_0-\delta)}e^{-j2\omega t} \end{aligned} \qquad (۳۱)$$

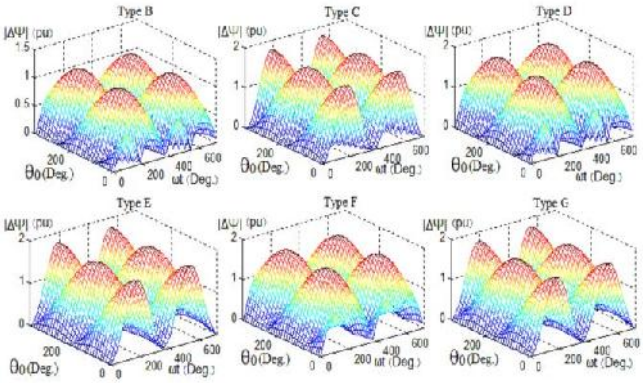
مسیر شار که توسط معادله فوق تعیین می‌شود، این بار دایره‌ای نبوده و به ضرایب جمله ثابت و جملات دوار بستگی دارد که توسط X(s)، Y(s) و θ_0 تعیین می‌شوند. در اینجا نیز δ تأثیری در شدت نوسانات ندارد. بر اساس رابطه (۱۹)، نوسانات گشتاور منطبق با تغییرات شار در راستای d و q می‌باشد. با کم کردن شار اولیه (رابطه (۱۳)) از معادله شار، رابطه تغییرات شار استاتور در حین فلش ولتاژ به شکل زیر بدست می‌آید:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.1 Spring 2016

$$\psi_{s(dur.sag)} = \frac{V_m}{\omega}\left(\frac{Y(s)}{3}-1\right)e^{j(\theta_0+\delta)} + \frac{V_m}{3\omega}\left(3e^{j(\theta_0+\delta)} - Y(s)e^{j(\theta_0+\delta)} + X(s)e^{-j(\theta_0-\delta)}\right)e^{-j\omega t} - \frac{V_m}{3\omega}X(s)e^{-j(\theta_0-\delta)}e^{-j2\omega t} \quad (۳۲)$$

هنگام بازگشت دامنه ولتاژ، اگر فاصله شار از موقعیت نرمال خود حداکثر باشد (اندازه رابطه ۳۲ حداکثر باشد)، دامنه نوسانات گشتاور نیز ماکزیمم خواهد بود. طبق رابطه (۳۲)، فاصله شار از مقدار اولیه خود نیز به X(s)، Y(s) و θ_0 بستگی داشته و برای انواع مختلف فلش‌های نامتقارن متفاوت است. پس بر خلاف فلش متقارن در فلشهای نامتقارن لحظه شروع فلش پارامتری است که می‌تواند بر تغییرات شار تاثیر بگذارد. همچنین مسیر شار در این حالت دارای یک جمله ثابت و دو جمله دوار است که سرعت یکی دو برابر دیگری است. بنابراین مسیر شار در این حالت دیگر دایره نبوده و بستگی به ضرایب جمله های ثابت و دوار دارد.

به ازای یک s مشخص، مقادیر X(s) و Y(s) برای هر فلش معلوم است. با ثابت گذاشتن این مقادیر، نمودار سه بعدی حداکثر اندازه تغییرات شار بر حسب تغییرات θ_0 و ωt برای انواع مختلف فلش ولتاژ در شکل ۵ رسم شده است. با استفاده از این نمودارها بدترین مشخصه‌ها برای هر نوع فلش به راحتی قابل تعیین است. البته میزان پیک گشتاور به s (از طریق X(s) و Y(s)) نیز بستگی دارد که فلش ولتاژ با s=۰/۱ بدترین حالت خواهد بود.



شکل (۵): نمودار سه بعدی حداکثر تغییرات شار در حین فلش، نسبت به تغییرات طول مدت فلش و نقطه آغاز آن روی موج ولتاژ با s=۰/۱.

بر اساس این شکل، برای فلش‌های نوع B، D و F اگر محل شروع فلش روی موج ولتاژ $k\pi+\pi/2$ باشد، تغییرات شار برای بازگشت به نقطه نرمال و در نتیجه دامنه نوسانات گشتاور حداکثر خواهد بود. در حالی که برای فلش‌های C، E و G اگر فلش در نقطهٔ $k\pi$ اتفاق بیفتد، دامنه نوسانات حداکثر خواهد بود.

همچنین در این شکل مشاهده می‌کنیم که وقتی طول مدت فلش برابر $KT+T/2$ باشد، که T دوره تناوب منبع تغذیه است، دامنه نوسانات گذرای شار و گشتاور حداکثر خواهد بود و اگر KT باشد، نوسانات حداقل خواهد بود.

۴- شبیه‌سازی

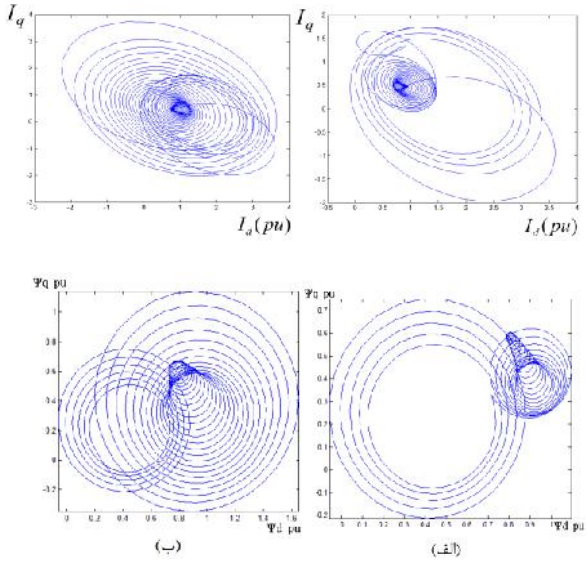
در این بخش، برای بررسی صحت تئوری مطرح شده، یک موتور سنکرون نمونه شبیه‌سازی شده و انواع مختلف فلش به آن اعمال شده‌اند. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، مسیر شار استاتور و نوسانات گشتاور ماشین در حین و بعد از فلش ولتاژ بررسی شده و مشخصات فلش‌های بحرانی با شبیه‌سازی تعیین گشته است.

ماشین مدل شده، در دستگاه دومحوری، بر اساس [۱۷] و در محیط MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده‌است. روابط ریاضی برای مدلسازی موتور، بر اساس [۱۶] است. مقادیر نامی و پارامترهای موتور شبیه‌سازی شده در ضمیمه آمده‌است. شبیه‌سازی‌ها برای s=۰/۵ یعنی فلش ۵۰٪ انجام شده‌است.

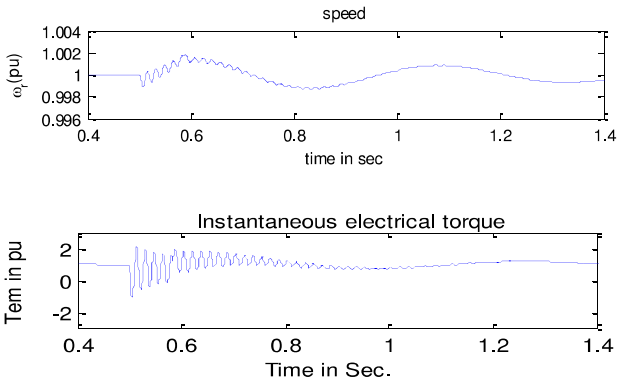
شکل ۶-الف مسیر شار استاتور در قاب سنکرون را در حین و بعد از وقوع فلش سه فاز متقارن با s=۰/۵ و طول مدت ۵ سیکل در ترمینال ماشین، نشان می‌دهد. به علت وجود عوامل میرایی شعاع دایره‌ها در حال کاهش است. چون در اینجا طول مدت فلش مضربی از دوره تناوب تغذیه است، بعد از فلش، شار در نزدیکی مکان اولیه خود قرار دارد و بنابراین کمترین نوسانات شار و گشتاور را خواهیم داشت. شکل ۷ گشتاور الکترومکانیکی لحظه‌ای ماشین را در این شرایط نشان می‌دهد.

طبق تئوری بحث شده، اگر طول فلش یک نیم سیکل از مضرب دوره تناوب بیشتر باشد، هنگام بازگشت دامنه ولتاژ، شار در بیشترین فاصله از مکان اولیه خود قرار داشته و بدترین حالت برای نوسانات بعد از فلش ولتاژ خواهد بود. این حالت در شکل ۶-ب نشان داده شده‌است. شکل ۸ نیز گشتاور الکترومکانیکی را در این شرایط نشان می‌دهد.

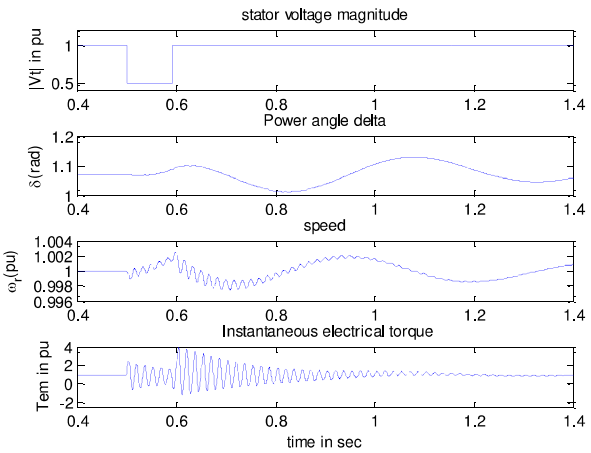
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016



شکل (۶): مسیر شار استاتور و جریان استاتوردر قاب سنکرون در حین وبعد از فلش نوع A با s=۰/۵ و طول مدت (الف) ۵ و (ب) ۵/۵ سیکل.



شکل(۷): سرعت و گشتاور لحظه‌ای موتور به دنبال وقوع فلش نوع A با s=۰/۵ و طول مدت ۵ سیکل.

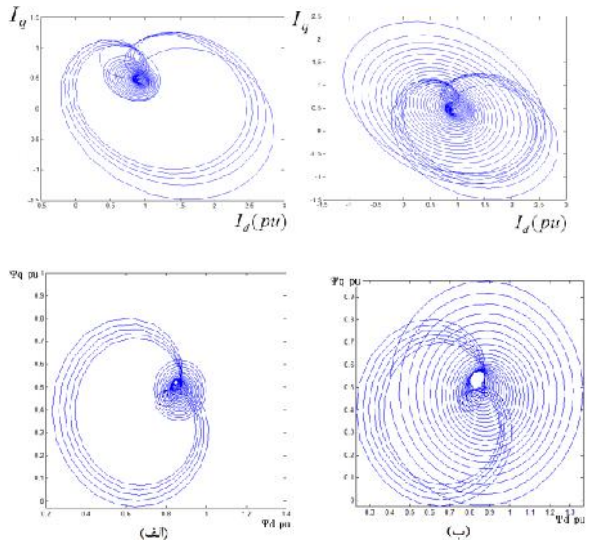


شکل(۸): ولتاژ مؤثر، زاویه بار، سرعت و گشتاور لحظه‌ای موتور به دنبال وقوع فلش نوع A با s=۰/۵ و طول مدت ۵/۵ سیکل.

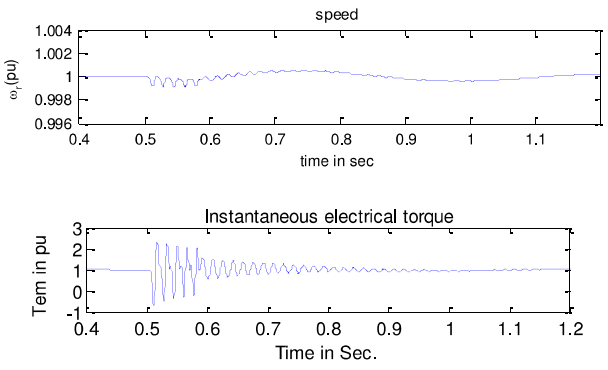
در مورد فلش‌های نا متقارن، چون بدترین حالت برای انواع B، D و F یکسان و C، E و G یکی است، انواع B و C به عنوان نماینده این دسته ها شبیه‌سازی شده‌اند.

شکل ۹-الف مسیر شار استاتور در قاب سنکرون را در صفحه مختلط، حین و بعد از وقوع فلش نوع B، با s=۰/۵ و طول ۵ سیکل در ترمینال ماشین نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت، چون طول مدت فلش مضربی از دروه تناوب تغذیه است، دامنه نوسانات شار و گشتاور حداقل است.

شکل ۱۰ گشتاور لحظه‌ای موتور را در این حالت نشان می-دهد. شکل ۹-ب مسیر شار را به دنبال بدترین فلش از نظر طول مدت و نقطه شروع برای فلش نوع B و شکل ۱۱ گشتاور لحظه-ای موتور را در این حالت نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنید که دامنه نوسانات شار و گشتاور به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته‌است.



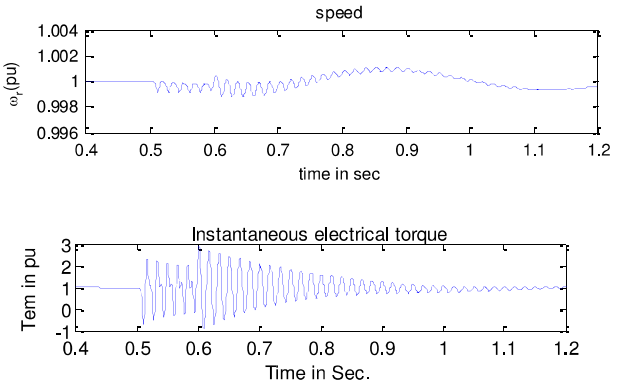
شکل (۹): مسیر شار استاتور و جریان استاتوردر قاب سنکرون در حین وبعد از فلش نوع B با s=۰/۵ و طول مدت (الف) ۵ و (ب) ۵/۵ سیکل.



شکل (۱۰): گشتاور لحظه‌ای موتور به دنبال وقوع فلش نوع B با s=۰/۵ و طول مدت ۵ سیکل.

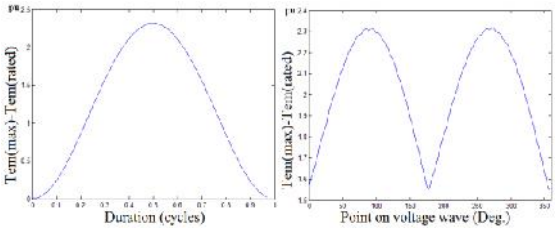
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]



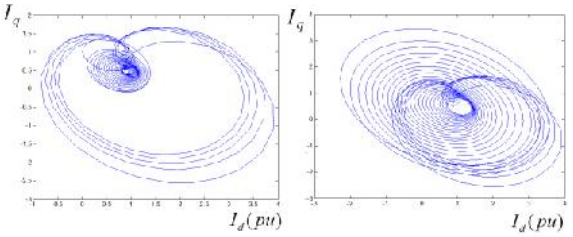
شکل(۱۱): سرعت و گشتاور لحظه‌ای موتور به دنبال وقوع فلش نوع B با s=۰/۵ و طول مدت ۵/۵ سیکل.

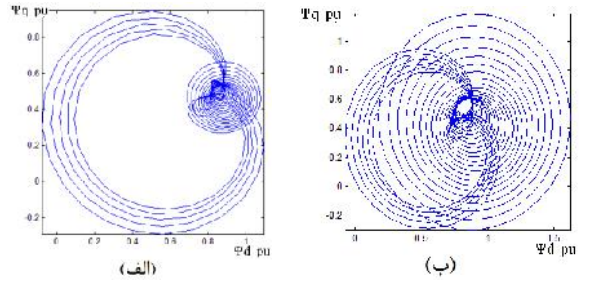
شکل ۱۲ پیک تغییرات گشتاور نوسانی را به دنبال وقوع فلش نوع B، نسبت به تغییرات طول مدت فلش و نیز زاویه ولتاژ در فاز a، هنگام شروع فلش ولتاژ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود فلش با طول مدت نیم سیکل و نقطه شروعی برابر مضرب فردی از $\pi/2$ شدیدترین پیامدها را در پی خواهد داشت.



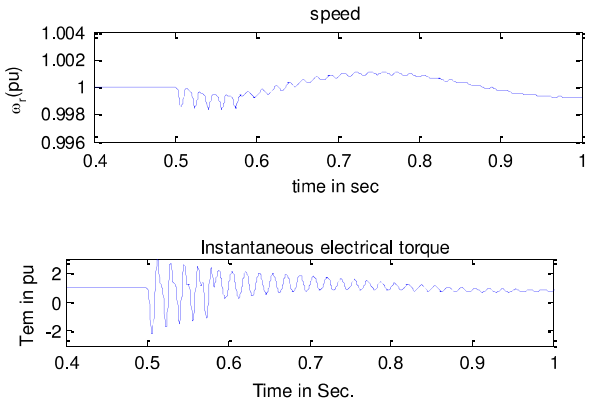
شکل(۱۲): پیک تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی با تغییرات طول مدت فلش و فاز ولتاژ هنگام وقوع فلش برای فلش نوع B.

در مورد فلش نوع C، نقطه بحرانی وقوع فلش ولتاژ روی موج ولتاژ متفاوت خواهد بود. شکل های ۱۳-الف و ۱۴ مربوط به فلشی با طول مدت ۵ سیکل است. اینجا نیز تئوری مطرح شده صادق است.

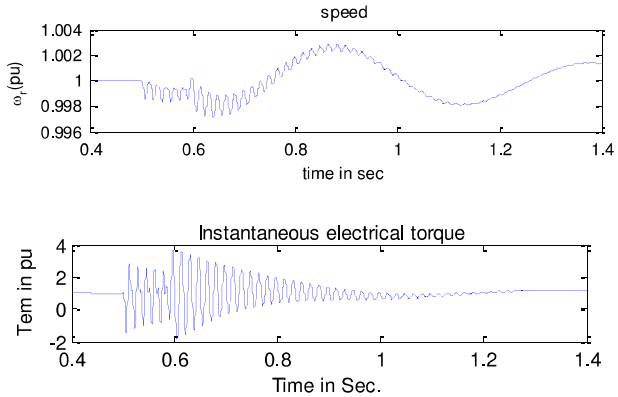




شکل(۱۳): مسیر شار استاتور و جریان استاتوردر قاب سنکرون در صفحه مختلط در حین وبعد از فلش نوع C با s=۰/۵ و طول مدت (الف) ۵ و (ب) ۵/۵ سیکل.



شکل (۱۴): سرعت و گشتاور لحظه‌ای موتور به دنبال وقوع فلش نوع C با s=۰/۵ و طول مدت ۵ سیکل.

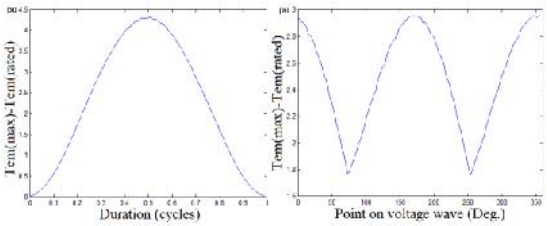


شکل (۱۵): سرعت و گشتاور لحظه‌ای موتور به دنبال وقوع فلش نوع C با s=۰/۵ و طول مدت ۵/۵ سیکل.

شکلهای ۱۳-ب و ۱۵ شبیه‌سازی‌های مربوط به فلش نوع C با طول مدت ۵/۵ سیکل را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، حالات گذرای به وجود آمده بسیار شدیدتر از شکل‌های ۱۳-الف و ۱۴ است. شکل ۱۶ چگونگی تغییرات پیک گشتاور نوسانی را با تغییرات طول مدت فلش و نقطه شروع فلش روی موج ولتاژ، نشان می‌دهد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol13 No.1 Spring 2016



شکل (۱۶): پیک گشتاور الکترومکانیکی با تغییرات طول مدت فلش و فاز ولتاژ هنگام وقوع فلش برای فلش نوع C.

۵- نتیجه‌گیری

برای بررسی تأثیر انواع مختلف فلش ولتاژ بر ماشینهای سنکرون ، از روابط ولتاژ، شار استاتور و گشتاور استفاده شد. به طوری که تغییرات شار ناشی از تغییرات ولتاژ، با انتگرال‌گیری از ولتاژ بدست‌آمده و به شار اولیه اضافه می‌شود. نهایتاً الگوی نوسانات گشتاور براساس نوسانات شار تعیین گردید.

برای فلش‌های متقارن، نقطه شروع فلش روی موج ولتاژ تأثیری در شدت نوسانات ندارد. در این فلش‌ها اگر طول مدت فلش مضربی از دوره تناوب تغذیه باشد، حداقل دامنه نوسانات، و اگر از مضرب دوره تناوب یک نیم سیکل بیشتر باشد، شار از موقعیت دائمی خود بیشترین فاصله را داشته، نوسانات گشتاور شدیدترین وضعیت را خواهد داشت. همچنین اگر فلش شدیدتر باشد (ولتاژ باقیمانده کمتر باشد)، شدت نوسانات بیشتر خواهد بود.

شدت نوسانات در حین و بعد از فلش نامتقارن، به شدت فلش، طول مدت آن و نقطه شروع فلش روی موج ولتاژ بستگی دارد. برای انواع B، D و F اگر زاویه ولتاژ فاز a هنگام وقوع فلش $k\pi+\pi/2$ باشد، نوسانات گشتاور حداکثر و اگر $k\pi$ باشد، حداقل خواهد بود. برای انواع C، E و G ، اگر زاویه اولیه ولتاژ هنگام وقوع فلش $k\pi$ باشد، نوسانات گشتاور حداکثر و اگر $k\pi+\pi/2$ باشد، حداقل خواهد بود. اثر طول مدت برای فلش‌های نامتقارن مشابه نوع متقارن است.

ضمایم

ضمیمه الف

مقادیر نامی و پارامترهای موتور سنکرون شبیه‌سازی شده به شرح ذیل است [18]:

جدول (الف-۱)- مقادیر نامی و پارامترهای موتور سنکرون.

Quantity	Symb.	Value	Unit
Speed	n	1800	r/min
Inertia	J	960	kgm^2
Voltage line-line	U_{ll}	10.5	kV
Apparent power	S	4150	kVA
Current	I	228	A
Power factor	$\cos\phi$	0.9	Capacitive
Pole pairs	P	2	-
Inductance d	L_d	151	mH
Transient inductance d	L'_d	25	mH
Subtransient inductance d	L''_d	17	mH
Inductance q	L_q	75	mH
Subtransient inductance q	L''_q	26	mH
Armature time constant	T_a	0.1	s
Field winding time constant	T_{d0}	4.33	s

مراجع

[۱] مهدی بابایی ترکمانی ، حسن رستگار "ارزیابی فلیکر ایجاد شده از ژنراتور درایو شده توسط توربین انبساطی در شبکه توزیع" مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال هفتم ، شماره اول ،۱۳۸۹

[۲] مهدی معلم ، امیر فرخ پیام، حسین شیروانی، محمد کیوانفرد، بهزاد میرزاییان دهکردی "یک روش کارامد برای تخمین حالت مولفه اصلی و هارمونیکی در شیکه های توزیع شعاعی" مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال هفتم ، شماره اول ،۱۳۸۹

[۳] علیرضا جلیلیان ، امیر اصلانیان "مقایسه مدل های بار در محیط های هارمونیکی و شبیه سازی بر روی شبکه الکتریکی یک واحد صنعتی" مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال اول ، شماره اول ،۱۳۸۳

[4] B. W. Kennedy, Power Quality Primer, New York: McGraw-Hill, 2000.

[5] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, Electrical Power systems Quality, 2nd ed. McGraw-Hill, 2004.

[6] C. Sankaran, Power Quality, New York: CRC Press LLC, 2002.

[7] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard 1159-1995, June 1995.

[8] M. H. J. Bollen, "IEEE tutorial on voltage sag analysis," IEEE Press, October 1999.

[9] Larry E. Conrad, M. H. J. Bollen, "Voltage Sag Coordination for Reliable Plant Operation", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 6, 1997.

[10] J. Arrillaga, M. H. J. Bollen and N. R. Watson, "Power quality following deregulation," Proc. o f the IEEE, vol. 88, pp. 246-261, February 2000.

[11] F. Carlsson, H. -P. Nee and C. Sadarangani, "Analysis of peak torque of line-operated synchronous machines subjected to symmetrical voltage sags," in Proc. of the International

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]

Conference on Power Electronics, Machines and Drives, pp. 480-485, June 2002.
[12] J. C. Das, "Effects of momentary voltage dips on the operation of induction and synchronous motors," IEEE Trans. on on Industry Applications, vol.26, pp.711-718, 1990.
[13] L. Guasch, F. Córcoles, J. Pedra, "Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, 2004
[14] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York: IEEE Press, 2000.
[15] M. H. J. Bollen, "Voltage recovery after unbalanced and balanced voltage dips in three-phase systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 18, pp. 1376–1381, Oct. 2003.
[16] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery, 2nd ed. New York: Wiley, 2002.
[17] C. M. Ong, Dynamic Simulation of Electrical machinery, Using Matlab/Simulink, New Jersey: Prentice Hall, 1998, ch. 7.
[18] F. Carlsson, 'Explanation to Irregularities in the Dependence Between Voltage Sag Magnitude and the Tripping Level for Line Operated Synchronous Machines', Conference Record of the Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting, Oct. 2003, Vol. 2, pp. 1085-1062.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.1.12.6]