مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۹، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۷۶-۶۷

تاثیر فیلترهای اکتیو و پسیو در کاهش ولتاژ القایی شفت ژنراتورهای سنکرون با استفاده از کنترلر و مقایسه آنها

محمود سمیعی مقدم [۱]، شکرالله شکری کجوری [۲]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، samiei@ee.kntu.ac.ir
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی، shokri@eetd.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۴/۰۹/۱۳، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۴/۱۱/۱۷)

چکیده: این مقاله بر روی کاهش ولتاژ القایی شفت با استفاده فیلترهای پسیو و اکتیو تمرکز نموده است. فیلتر پسیو از نوع RLC بوده و فیلتر اکتیو یک مبدل DC/DC باک کنترل شونده می باشد. فیلترهای پسیو و اکتیو در خروجی یکسوساز تریستوری قرار گرفته اند. از فیلترها به منظور کاهش پیک های فرکانس بالای ناشی از سوئیچینگ یکسوساز استفاده شده است. در سیستم تحریک استاتیک روشن و خاموش شدن تریستورها باعث ایجاد پیک های فرکانس بالا در خروجی DC یکسوساز می شوند. وجود این پیک های فرکانس بالا موجب بروز خازنهای پارازیتی در ژنراتور سنکرون می شود. خازنهای پارازیتی به روش FEM آنالیز و محاسبه شده اند. کاهش این پیک های فرکانس بالا موجب کاهش ولتاژ القایی شفت می شود. استفاده از مبدل باک به دلیل رفتار مینیمم فاز آن نسبت به دیگر مبدلها ترجیح داده شده است. در سیستم تحریک استاتیک ژنراتور سنکرون 5kw از یکسوساز شش پالسه تریستوری استفاده شده است. با توجه به اینکه دامنه ولتاژ شفت به فیلتر بخش DC یکسوساز وابسته است فیلترهای پسیو و اکتیو هر دو درکاهش ولتاژشفت نقش دارند اما مبدل باک کنترل شده به عنوان فیلتر اکتیو بیشترین کاهش ولتاژشفت را به همرا داشته است. لذا استفاده از فیلتری همچون مبدل باک می تواند ولتاژ شفت را با توجه به کارهای انجام شده قبلی به میزان قابل توجه ای کاهش دهد.نتایج شبیه سازی و ساخت موضوع فوق را به اثبات رسانده است. این کاهش ولتاژ منجر به افزایش طول عمر یاتاقانهای ژنراتورهای سنکرون می شود.

کلمات کلیدی: ولتاژ القایی شفت، فیلتر پسیو ، فیلتر اکتیو و سیستم تحریک استاتیک.

Effect of Active and Passive Filters on Induced Shaft Voltage on Synchronous Generators Using Controller: A Comparative Study

Mahmood Samiei-Moghaddam, Shokrollah Shokri Kojori

Abstract: In this paper, we investigate the reduction of shaft induced voltage using both active and passive filters. An RLC circuit for passive filter and a DC-DC buck converter for active filter is used which can remove the high-frequency spikes leading to the reduction in induced shaft voltage. Buck converter has a minimum-phase behavior and therefore is preferred to any other converters. A static excitation system using 6-pulse thyristor rectifier is employed for 5 kW synchronous generators. Active and passive filters are placed between rectifier and excitation winding of the synchronous generator. As simulation and experimental results show, both filters are capable to remove the parasitic capacitance efficaciously and so induced shaft voltage is mitigated significantly. However, in contrast to the passive filter, active filter shows the better performance to reducing the shaft induced voltage. This reduction can increase the life time of generator's bearing.

Keywords: Bearing current, Active filter, Induced shaft voltage, Passive filter, and Static excitation system.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]

۱- مقدمه

ولتاژهای شفت از جمله پدیده هایی هستند که در ماشین های دوار وجود دارند و منابع متفاوتی به نسبت های مختلف در بوجود آوردن این ولتاژ ها سهیم هستند. ولتاژهای شفت باعث بوجود آمدن جریان های عبوری از یاتاقان ها می گردد. این جریان ها از روغن یاتاقان ها عبور کرده و به مرور زمان با ایجاد حباب در آنها منجر به از کار افتادن آنها می شوند. دلیل اصلی ایجاد ولتاژ شفت سوئیچینگ ادوات الکترونیک قدرت می باشد. با انجام سوئیچینگ در سیستم تحریک استاتیک، خازنهای پارازیتی مسیرشان به شفت بسته شده و در آن ولتاژ القا می-نمایند.

عدم تقارن مغناطیسی، منابع الکترومغناطیسی، منابع الکترواستاتیکی و منابع ولتاژ خارجی که به سیم پیچ رتور اعمال می گردند چهارمنبع تولید ولتاژ شفت در ماشینهای گردان می باشد [۱]. در [۲-۳] یک فیلتر پسیو در خروجی اینورتر PWM به منظور کاهش ولتاژ مد مشترک و مد دیفرانسیلی که توسط اینورتر ایجاد می شود طراحی شده است. رفرنس [۴-۵] توسط فیلتر EMI نسبت به کاهش جریان یاتاقان و جریان نشتی زمین یک اینورتر PWM دیود کلمپ اقداماتی را انجام داده است. در رفرنس [۶] فیلتر پسیو مد مشترک به منظور کاهش ولتاژ شفت موتور و جریان یاتاقان موتور القایی که با اینورتر دو سطحی تغذیه می شود بکار برده شده است.

یک فیلتر EMI در [۷] برای اینورتر PWM که متشکل از دو فیلتر پسیو می باشد طراحی شده است. این فیلتر ها در خروجی اینورتر و موتور قرارداده شده که بتواند ولتاژهای مد مشترک ناشی از اینوتر، نقطه خنثی موتور و یکسوساز را جبران نماید. فیلتر هیبرید EMI برای جبران سازی ولتاژ مد مشترک اینورترها در [۸] نشان داده شده است. خازن فرکانس پایین و فیلتر LC سری استفاده شده در آن توانسته ولتاژ مد مشترک را کاهش دهد. رفرنس [۹] نشان می دهد که ولتاژ مد مشترک در خروجی اینورترهای منبع ولتاژ باعث ایجاد جریانهای یاتاقان می شود. سپس با استفاده از مدار الکترواستاتیکی نسبت به کاهش ولتاژ مد مشترک در ترمینالهای موتور و بعد از آن در رتور اقداماتی را انجام داده است.

کارهای مهمی برای درک علل پدیده ولتاژ شفت و جریان یاتاقان انجام پذیرفته است. سیستم تحریک استاتیک در طراحی ماشینهای سنکرون نقش اساسی دارد [۱۰]. در [۱۱] موتور القایی 15-kw توسط اینورتر PWM درایو شده و موجب ایجاد ولتاژ شفت شده است. نتایج آزمایشهای حاصل از ساخت نشان داده که خازنهای پارازیتی داخل موتور با ولتاژ فرکانس بالای مد مشترک که توسط اینورتر PWM ایجاد شده اند دلیل ایجاد ولتاژ شفت می باشند. یک نوع جدید از اینورتر در [۱۲] بررسی شده که نشان می دهد یکی از یاتاقان ها تحت جریان القایی قرار می گیرد. نتایج حاصل از ساخت نشان می دهد که جریانهای اندازه گیری شده و روابط فیزیکی تکنیک ارایه شده می توانندکاهش ولتاژ را تایید کنند.

یک روش مدولاسیون پهنای پالس در [۱۳] برای مبدلهای AC-DC-AC دو سطحی و سه سطحی به منظور کاهش ولتاژ مدمشترک این نوع مبدلها در ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه قفس سنجابی شرح داده شده است. در [۱۴] یک روش برای محاسبه تاثیر ضخامت عایق یاتاقان به منظور کاهش جریان آن به عنوان تابعی از پارامترهای طراحی ماشین بررسی شده است. رفرنس [۱۵] نتایج تست بر روی ولتاژ شفت و جریان یاتاقان درایوهای ولتاژ بالا که با مدولاسیون پهنای پالس کار می کنند را نشان می دهد. در آن بیان شده که اینورترهای منبع ولتاژ PWM دلیل ایجاد جریانهای یاتاقان می باشند. رفرنس [۱۶] یک فیلتر پسیو جدید نصب شده در خروجی ترمینالهای اینورتر PWM را نشان می دهد. این فیلتر برای حذف ولتاژ مد مشترک و ولتاژ مد دیفرانسیلی که توسط اینورتر PWM ایجاد می شود استفاده شده است. در [۱۷] یک آنالیز سیستماتیک بر روی ولتاژ مد مشترک در توپولوژی های مختلف مبدلها ی بکار برده شده در درایوهای ac دوسطحی اینورترهای منبع ولتاژ، اینورترهای منبع جریان و اینورترهای چند سطحی شرح داده شده است. مولفان مقاله در رفرنس [۱۸] در مورد ولتاژ شفت بوجود آمده در موتور القایی توسط اینورتر مدولاسیون پهنای پالس بحث نموده اند.

یک مدار معادل مد مشترک موتور القایی در [۱۹] آمده است. در آن اثر کاهش ولتاژ شفت را با یک روش جدید بیان نموده اند. با ولتاژ شفت محاسبه شده از مدار معادل و ولتاژ شفت اندازه گیری شده موتور توانسته اند درستی روش خود را تایید نمایند. در رفرنس [۲۰] یک روش عملی برای یافتن مدل فرکانس بالای به منظور پیشبینی جریان نشتی و ولتاژ شفت ماشین AC ارایه شده است. اثر ولتاژ های نقطه خنثی و سیم پیچی رتور بر روی ولتاژ شفت در [۲۱] بررسی شده است.

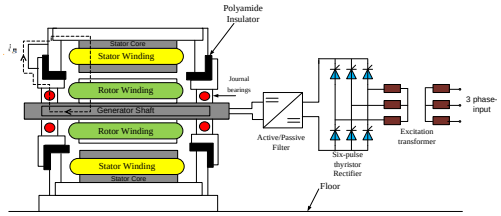
همانطور که ملاحظه گردید هیچ یک از مقالات ارایه شده در بالا آنالیز الکترواستاتیک ژنراتور سنکرون را مورد توجه قرار نداده اند. اثر خازنهای پارازیتی بر روی ولتاژ القایی شفت ژنراتور سنکرون در مقالات مرور شده نشان داده نشده است. در این مقاله یک روش جدید با در نظر گرفتن تمامی خازنهای پارازیتی ژنراتور سنکرون برای محاسبه ولتاژ شفت ارایه شده است. به منظور کاهش ولتاژ القایی شفت از فیلتر پسیو و اکتیو در خروجی یکسوساز تریستوری سیستم تحریک استاتیک ژنراتور سنکرون استفاده شده است.فیلتر پسیو از نوع RLC بوده و مبدل باک کنترل شونده به عنوان فیلتر اکتیو به منظور کاهش اسپایک های ناشی از سویچینگ یکسوساز در نظر گرفته شده است. مبدل باک به دلیل داشتن رفتار مینیم فاز بر دیگر مبدلها ترجیح داده شده است. این تحقیق منابع ولتاژ خارجی به سیم پیچی رتور که یکی از دلایل ایجاد ولتاژ شفت می باشد را مد نظر قرار داده است.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]

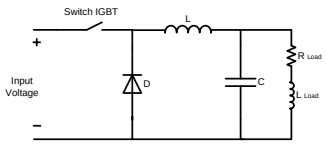
در ابتدا خازنهای پارازیتی ژنراتور به روش FEM با نرم افزار MAXWELL محاسبه می شوند، سپس سیستم تحریک استاتیک با نرم افزار متلب شبیه سازی شده و نتایج آن به همراه نتایج حاصل از ساخت برای اعتبار سنجی ارایه می گردد. در بخش دوم این مقاله مدلسازی سیتم پیشنهادی انجام پذیرفته و سپس در بخش سوم نتایج شبیه سازی ارایه شده است. در بخش چهارم نتایج حاصل از ساخت به همراه اعتبار سنجی آنها ارایه گردیده و نتیجه گیری نیز در بخش پنجم آمده است.

۲- مدلسازی سیستم تحریک استاتیک و فیلترها

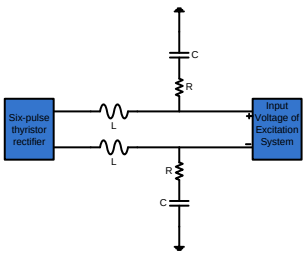
ساختار سیستم تحریک استاتیک در شکل (الف-۱) نشان داده شده است. این ساختار شامل ژنراتور سنکرون، یکسوساز شش پالسه تریستوری، ترانسفوماتور تحریک و فیلترها می باشد. در شکل (ب-۱) ساختار مبدل باک و در شکل (ج-۱) ساختار فیلتر پسیو پیشنهادی ارایه گردیده است.



(الف-۱)



(ب-۱)



(ج-۱)

شکل ۱: الف) ساختار سیستم تحریک استاتیک ژنراتور سنکرون
ب) ساختار مبدل باک ج) ساختار فیلتر اکتیو

۲-۱- محاسبه خازنهای پارازیتی

در این بخش خازنهای پارازیتی ژنراتور سنکرون ۵ کیلو وات با استفاده از مدلسازی عددی [۲۲-۲۳] به دست آمده اند. لیستی از سمبل-های بکار رفته در محاسبات خازنهای پارازیتی در قالب جدول (۱) معرفی گشته اند.

جدول ۱ : سمبلهای بکار برده شده برای محاسبه خازنهای پارازیتی

ردیف	سمبل	شرح سمبل
۱	ε_0	ضریب نفوذ پذیری خلا
۲	ε_R	ضریب نفوذ پذیری دی الکتریک
۳	R_B	شعاع ساچمه یاتاقان
۴	R_C	شعاع کلیریانس
۵	N_B	تعداد ساچمه
۶	C_B	خازن یاتاقان
۷	C_{SF}	خازن سیم پیچی استاتور به بدنه
۸	Ns	تعداد شیارهای استاتور
۹	L_S, W_D W_S	طول، عرض و ارتفاع هادی استاتور
۱۰	D	دی الکتریک
۱۱	K_{SF}	ضریب ثابت سیم پیچی استاتور به بدنه
۱۲	K_{SR}	ضریب ثابت استاتور به رتور
۱۳	N_R	تعداد هادی های رتور
۱۴	$W_R L_R$	طول و عرض رتور
۱۵	G	فاصله هوایی
۱۶	K_{RF}	ضریب ثابت رتور به بدنه
۱۷	R_S	شعاع داخلی استاتور
۱۸	R_R	شعاع خارجی رتور

برای بدست آوردن خازن یاتاقان از معادله (۱) استفاده می شود. خازن یاتاقان به ساختار هندسی یاتاقان، بار، سرعت، حرارت و مشخصات روغن وابسته است[۲۳].

$$C_b = \frac{N_b 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{(\frac{1}{R_b}-\frac{1}{R_b+R_c})} \quad (1)$$

در معادله (۱) N_b تعداد ساچمه های یاتاقان و R_b شعاع ساچمه و R_c شعاع کلیریانس می باشد. برای محاسبه این خازن می بایست ضریب دی الکتریک استفاده شده در یاتاقان را بدست آورد که در این ژنراتور از گریس در یاتاقانهای آن استفاده شده است.

برای محاسبه خازن سیم پیچی استاتور نسبت به بدنه از معادله (۲) استفاده می شود[۲۳].

$$C_{sf} = \frac{K_{sf} N_s \varepsilon_r \varepsilon_0 (W_d + W_s) L_s}{d} \quad (2)$$

همانطور که مشاهده می شود Ns تعدادشیارهای استاتور و L_s, W_d W_s به ترتیب طول، عرض و ارتفاع شیار استاتور می باشند. پارامتر d دی الکتریک سیم پیچ استاتور و $\varepsilon_0\varepsilon_r$ ضریب نفوذ پذیری خلا و دی الکتریک استفاده شده در سیم پیچی استاتور می باشد.در این معادله K_{sf} ضریب ثابت سیم پیچی استاتور به بدنه می باشد

محاسبه خازن استاتور به رتور با توجه به معادله (۳) انجام می پذیرد[۲۴].

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]

$$C_{sr} = \frac{K_{sr} N_r \varepsilon_0 W_r L_r}{g} \quad (3)$$

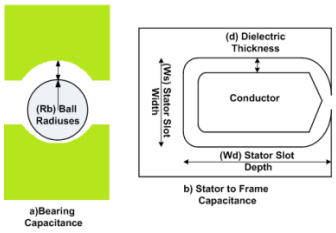
در این معادله N_r تعداد هادی های موازی رتور می باشند. L_r طول رتور و W_r عرض رتور است. پارامتر g فاصله هوایی بین استاتور و رتور بوده و K_{sr} ضریب ثابت استاتور به رتور است.

معادله (۴) نحوه محاسبه خازن رتور به بدنه را نشان می دهد[۲۴].

$$C_{rf} = \frac{K_{rf} \pi \varepsilon_0 L_r}{\ln(\frac{R_s}{R_r})} \quad (4)$$

در این معادله R_s شعاع داخلی استاتور و R_r شعاع خارجی رتور می باشند. پارامتر K_{rf} نیز ضریب ثابت رتور نسبت به بدنه می باشد.

در شکل (۲) نحوه بررسی ابعاد خازنهای پارازیتی ژنراتور سنکرون آمده است.



شکل ۲: ساختار بخش هایی از ژنراتور سنکرون برای محاسبه خازنهای پارارزیتی

۲-۲- مدل سازی فیلتر اکتیو

مقادیر مبدل باک طبق یک سری روابط ریاضی که در زیر آورده شده است طراحی شده اند. این مقادیر باید به گونه‌ای انتخاب شوند که در معادله (۵) و (۶) صدق کنند.

$$\frac{1}{\sqrt{LC}} << \omega_n \quad (5)$$

$$\frac{1}{RC} << \frac{\omega_n}{Q} \quad (6)$$

L مقدار سلف، C مقدار خازن و ω_n مقدار فرکانس زاویه‌ای مبدل باک می‌باشد. رابطه (۶) رابطه میان مقاومت و خازن می‌باشد.

ω_n از رابطه(۷) بدست می‌آید. در این رابطه T_s پریود سوئیچینگ می‌باشد.

$$\omega_n = \frac{\pi}{T_s} \quad (7)$$

برای بدست آوردن مقدار ریپل خروجی مبدل باک از رابطه (۸) استفاده می شود.

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C}\frac{1}{2}\frac{\Delta I_L}{2}\frac{T_s}{2} \quad (8)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_0}{L}(1-D)T_s \quad (9)$$

با جایگذاری Δ_{IL} در رابطه (۸) خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1}{8}\frac{T_s^2(1-D)}{LC} = \frac{\pi^2}{2}(1-D)\left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 \quad (10)$$

که در آن f_s فرکانس سوئیچینگ و fc فرکانس گوشه می باشد و از رابطه زیر بدست می آید

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11).$$

رابطه(۱۰) نشان می‌دهد که ریپل ولتاژ خروجی را می‌توان با انتخاب فرکانس گوشه fc در فیلتر پایین گذر خروجی به شکلی انتخاب نمود که $fc << f_s$ باشد تا بتوان آن‌را به حداقل مقدار خود رساند. بنابراین می‌توانیم با تبدیل اسپایکهای حاصل از سوئیچینگ به ریپل با دامنه بسیار کم در خروجی یکسوساز تریستوری اثر خازنهای پارازیتی را کم نمود تا به تبع آن دامنه ولتاژ شفت نیز کاهش یابد. مبدل باک کنترل شونده به عنوان فیلتر اکتیو به منظور کاهش ولتاژ القایی شفت در نظر گرفته شده است. مبدل باک به دلیل داشتن رفتار مینیم فاز بر دیگر مبدلها ترجیح داده شده است.

۲-۳- مدل سازی فیلتر پسیو

هارمونیکها در بیشتر ادوات الکترونیک قدرت بر اثر سویچینگ مبدلها بوجود می آیند. آنالیز هارمونیکها نقش اساسی در سیستمهای کنترل را دارند.

اگر ولتاژ اعمال شده به فیلتر را با V و جریان عبوری از آن را با I نمایش دهیم، با فرض اینکه ω_0 سرعت زاویه ای در فرکانس اصلی و ω_r سرعت زاویه ای در فرکانس تشدید مربوط به مرتبه هارمونیکی n ام باشند، روابط الکتریکی حاکم بر این نوع فیلتر را می توان به صورت زیر نوشت[۱۶]:

$$\left.\begin{aligned} X_L &= L\omega_0 \\ X_C &= \frac{1}{C\omega_0} \\ (n\omega_0)^2 &= \frac{1}{LC} \end{aligned}\right\} \Rightarrow X_L = \frac{1}{n^2}X_C \quad (12)$$

$$Q_{ST} = \frac{n.X_L}{R} \quad (13)$$

$$|I| = \frac{|V|}{\sqrt{R^2 + (X_c - X_L)^2}} \quad (14)$$

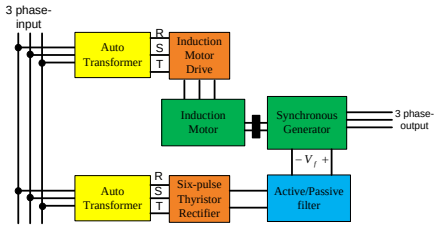
این فیلتر پایین گذر RLC به صورت متقارن در خروجی یکسوساز تریستوری مطابق شکل (۱) قرار می گیرد. کیفیت فیلتر طبق رابطه (۱۳) به صورت نسبت امپدانس سلفی فیلتر در فرکانس تشدید به مقاومت آن تعریف می گردد.

۳- شبیه سازی و نتایج حاصله

نتایج شبیه سازی در این بخش شرح داده شده است. بر این اساس در شکل (۳) شماتیک دیاگرام سیستم شبیه سازی شده مورد مطالعه توسط نرم افزار متلب نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می-شود از شبکه سه فاز برای تغذیه اینورتر موتور القایی استفاده شده است.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]

استفاده از اینورتر به منظور راه اندازی نرم موتور القایی می باشد. موتور القایی به عنوان محرک اولیه ژنراتور سنکرون بوده و برای تغذیه DC این ژنراتور از یکسوساز شش پالسه تریستوری استفاده گردیده است. نتایج شبیه سازی بر اساس اعمال فیلتر پسیو و اکتیو در خروجی یکسوساز سیستم تحریک استاتیک بوده است.



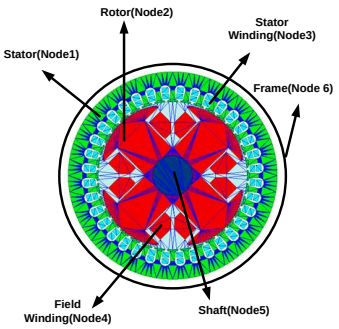
شکل ۳ : شماتیک دیاگرام سیستم شبیه سازی

۳-۱ محاسبه خازنهای پارازیتی

برای محاسبه خازنهای پارازیتی ژنراتور سنکرون 5kw از نرم افزار MAXWELL به روش FEM استفاده شده است. با استفاده از نرم افزار Maxwell در حالت دو بعدی، ظرفیت خازنی بین دو هادی با شبیه سازی میدان الکتریکی ناشی از اختلاف پتانسیل اعمالی بدست می-آید.

$$C = \frac{2w_e}{v^2} \quad (15)$$

با محاسبه انرژی ذخیره شده در میدان الکتریکی، ظرفیت خازنی متناظر به این صورت رابطه (۱۵) قابل محاسبه است:



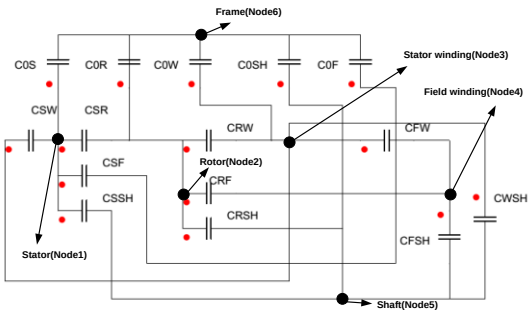
شکل ۴ : گره بندی ژنراتور سنکرون به منظور محاسبه خازنهای پارازیتی

با گره بندی ژنراتور می‌توان خازنهای پارازیتی متقابل بین هر دو گره را بدست آورد. بنابراین ژنراتور به ۶ گره (نود) شامل استاتور، رتور، سیم پیچی استاتور، سیم پیچی رتور، شفت و قاب ژنراتور تقسیم بندی می شود. شکل (۴) هر یک از این قسمت ها را به صورت جداگانه نشان می‌دهد. پس از انجام گره بندی ژنراتور اکنون باید خازنهای پارازیتی متقابل هر یک از گره ها محاسبه شود. آنالیز الکترواستاتیک ژنراتور سنکرون توسط نرم افزار MAXWELL انجام شده و نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. در این جدول اندیس های S و W و R و SH و F و 0 به ترتیب استاتور، سیم پیچی استاتور، رتور، شفت، سیم پیچی میدان و فریم می باشند.

جدول ۲: مقادیر خازنهای پارازیتی

ردیف	خازنهای متقابل	مقدار خازن پارازیتی (pF)
۱	C_{SW}	8207.3
۲	C_{SR}	3480.7
۳	C_{SSH}	2319.3
۴	C_{SF}	1035.3
۵	C_{0R}	333.26
۶	C_{0S}	367.74
۷	C_{0W}	352.33
۸	C_{0F}	273.51
۹	C_{0SH}	332.68
۱۰	C_{RW}	2449
۱۱	C_{RF}	1418.2
۱۲	C_{RSH}	758.09
۱۳	C_{FW}	918.18
۱۴	C_{WSH}	2446.6
۱۵	C_{FSH}	1418.1

برای بررسی کاملتر ولتاژ شفت ناشی از سیستم تحریک استاتیک ژنراتور سنکرون می بایست اثرات خازنهای پارازیتی را بطور کامل در نظر گرفت. لذا توسعه مدلهای ارایه شده قبلی ضروری به نظر می رسد. برای انجام این کار می بایست تحلیل الکترواستاتیکی ژنراتور سنکرون بطور کامل انجام شود. در شکل (۵) خازنهای پارازیتی متقابل شش گره در ژنراتور سنکرون نشان داده شده است. با در نظر گرفتن گره ها می-توان کلیه خازنهای پارازیتی متقابل آنها را بدست آورد.



شکل ۵ : خازنهای پارازیتی متقابل شش گره ژنراتور سنکرون

مقادیر جدول ۳ در واقع عناصر یک مبدل باک غیر ایده آل می-باشند. در مبدلهای الکترونیک قدرت ایده آل از در نظر گرفتن ESR(Equal Series Resistance) خازن و سلف و تلفات عناصر نیمه هادی صرف نظر می شود. دراین مقاله برای نزدیک کردن شبیه سازی ها به نتایج تجربی ، این پارامترها در شبیه سازی نیز در نظر گرفته شده است. در مبدل باک از کنترلر مد لغزشی برای کنترل ولتاژ خروجی استفاده شده است که این موضوع دینامیک مبدل را در پاسخ

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]

به اغتشاشات بهتر نموده است. سطح لغزش کلید زنی سوئیچ است زیرا کنترل آن در دو سمت سطح لغزش در نظر گرفته می‌شود. با بسط دینامیکی معادله (۱۶) خواهیم داشت [۲۴]:

$$\dot{X} = f(x,t,u) \quad (16)$$

$$\dot{\sigma}(x) = C^T \dot{x} \cong 0 \quad (17)$$

با توجه به رابطه (۱۷) خواهیم داشت:

$$\dot{\sigma}(x) = \begin{cases} C^T Ax + C^T Bu^+ + C^T D < 0 & for \quad \sigma(x) > 0 \\ C^T Ax + C^T Bu^- + C^T D > 0 & for \quad \sigma(x) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

اگر در مبدل باک نقطه کار روی سطح لغزش $\sigma(x)=0$ باشد سیستم در مد لغزشی است.

$$\sigma(x) = c_1 x_1 + \dot{x}_1 \approx 0 \quad (19)$$

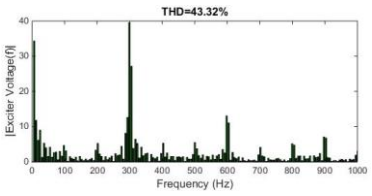
لذا خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \lambda_1(x) \cong \left(c_1 - \frac{1}{R_L C}\right) x_2 - \frac{1}{LC} x_1 - \frac{V_{ref}}{LC} < 0 \quad for \quad \sigma(x) > 0 \\ \lambda_2(x) \cong \left(c_1 - \frac{1}{R_L C}\right) x_2 - \frac{1}{LC} x_1 - \frac{Vin - V_{ref}}{LC} > 0 \quad for \quad \sigma(x) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

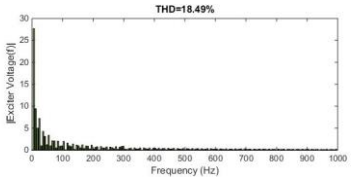
جدول ۳: پارامترهای فیلتراکتیو و پسیو

ردیف		پارامتر	مقدار
فیلتر اکتیو	۱	L (Inductance)	430 H
	۲	R_L (Inductance resistance)	20 $m\Omega$
	۳	C (Capacitor)	660 F
	۴	R_C (resistance of capacitor)	80 $m\Omega$
	۵	R_t (resistance in the transistor)	20 $m\Omega$
	۶	R_D (diode resistor)	16 $m\Omega$
	۷	V_g (input voltage)	15 V
	۸	V_o (output voltage)	30 V
	۹	T_s (switching period)	20 μs
فیلتر پسیو	۱	R (Resistance)	70 Ω
	۲	L (Inductance)	560 H
	۳	C (Capacitor)	470 F

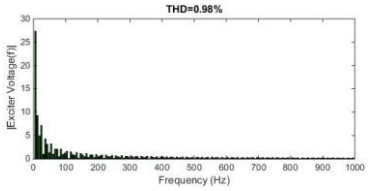
در شکل (۶) نتایج شبیه سازی مربوط به THD ولتاژ ورودی سیم پیچی تحریک در حالتهای بدون فیلتر، با فیلتر پسیو و با فیلتر اکتیو نشان داده شده است.



(الف-۶)



(ب-۶)

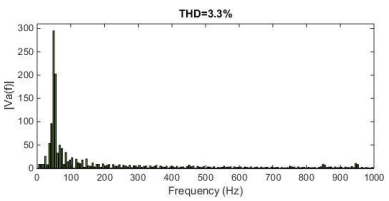


(ج-۶)

شکل ۶: نتایج شبیه سازی ولتاژ ورودی سیم پیچ تحریک الف) بدون فیلتر ب) با فیلتر پسیو ج) با فیلتر اکتیو

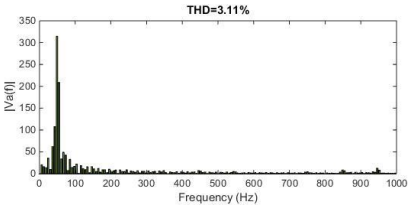
همان گونه که مشاهده می شود مقدار THD ولتاژ تحریک با استفاده از فیلتر اکتیو دارای مقدار بسیار کمی بوده که نشان دهنده عملکرد کنترلی مناسب مبدل باک در کاهش پیکهای فرکانس بالای سوئیچینگ تحریک استایک می باشد. کاهش پیک های فرکانس بالای ولتاژ ورودی سیم پیچ تحریک باعث کاهش اثر خازنهای پارازیتی و به تبع آن کاهش ولتاژ شفت ژنراتور سنکرون می گردد. خازنهای پارازیتی خازنهای مجازی هستند که در فرکانسهای بالا مسیرشان به سمت شفت بسته شده و موجب القای ولتاژ می شوند.

شکل (۷) نتایج شبیه سازی THD ولتاژ فاز"a" ژنراتور سنکرون را در حالتهای بدون فیلتر، با فیلتر پسیو و با فیلتر اکتیو نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود THD ولتاژ فاز"a" در حالت بدون فیلتر 3.3% بوده و با فیلتر پسیو .3.11% و با اعمال فیلتر اکتیو به مقدار 3.07% رسیده است. بنابراین اثر خازنهای پارازیتی توسط فیلتر اکتیو به کمترین مقدار خود رسیده است.

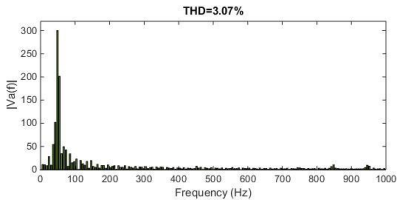


(الف-۷)

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]



(ب-۷)

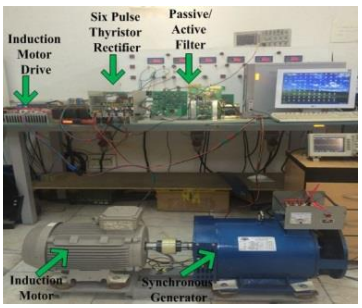


(ج-۷)

شکل ۷ : نتایج شبیه سازی ولتاژ فاز"a" ژنراتور سنکرون الف) بدون فیلتر ب) با فیلتر پسیو ج) با فیلتر اکتیو

۴- ۴-نتایج حاصل از ساخت

شکل (۸) نمایی از تجهیزات ساخته شده آزمایشگاهی را نشان می دهد. این تجهیزات شامل درایو ، ژنراتور سنکرون 5kw، یکسوساز کنترل شونده تریستوری و فیلترها می باشد.



شکل ۸ : نمای تجهیزات حاصل از ساخت

ابتدا ولتاژ سه فاز شبکه توسط اتو ترانسفورماتور کاهش یافته و سپس یکسوساز دیودی را تغذیه می کند. ولتاژ DC خروجی این یکسوساز به اینورتر دوسطحی که با مدولاسیون فضای برداری SVM کنترل می شود اعمال می گردد. وظیفه اینورتر راه اندازی نرم موتور القایی با کنترل ولتاژ و فرکانس آن می باشد.

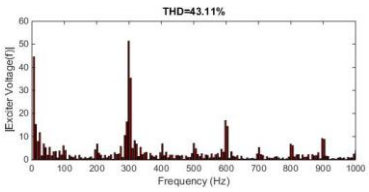
از یک ترانس کاهنده AC/AC برای تغذیه یکسوساز شش پالسه تریستوری استفاده شده است. با کنترل زاویه آتش تریستورها می توان ولتاژ خروجی یکسوساز را کنترل نمود. با توجه به اینکه در نیروگاه های بزرگ از یکسوساز تریستوری استفاده می شود لذا برای ایجاد یک سیستم تحریک استاتیک در مقیاس کوچکتر از یکسوساز تریستوری استفاده شده است. ولتاژ DC خروجی یکسوساز به عنوان ولتاژ ورودی سیم پیچ تحریک می باشد.

چون یاتاقانهای این ژنراتور به بدنه آن متصل هستند می بایست برای اندازه گیری ولتاژ شفت، لایه خارجی یاتاقان که به بدنه متصل است عایق بندی شود این کار توسط عایق پلی آمید مطابق شکل (۹) مقاله انجام شده است.با انجام این کار می توان ولتاژ هایی را که بر روی شفت بر اثر خازنهای پارازیتی القا می شوند را اندازه گیری نمود.

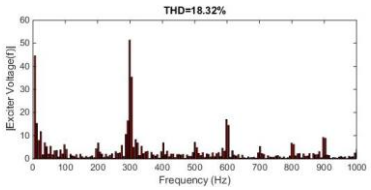


شکل ۹ : نحوه عایق سازی یاتاقانهای ژنراتور

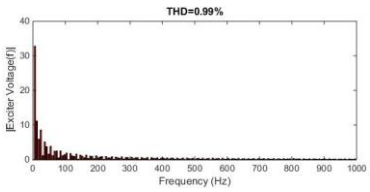
در شکل (۱۰) نتایج حاصل از ساخت مربوط به THD ولتاژ ورودی سیم پیچی تحریک در حالتهای بدون فیلتر، با فیلتر پسیو و با فیلتر اکتیو نشان داده شده است. دامنه ولتاژ القایی شفت به فیلتر های بخش DC یکسوساز وابسته است. بنابراین هر چقدر پیک های فرکانس بالاو ریپلهای ورودی به سیم پیچ تحریک ژنراتور سنکرون کاهش یابد اثر خازنهای پارازیتی کمتر شده و به تبع آن ولتاژ القایی شفت نیز کاهش می یابد. کاهش THD ولتاژ سیم پیچ تحریک توسط مبدل کنترل شونده باک دارای بیشترین مقدار بوده که نشان می دهد مبدل باک در کاهش اثر خازنهای پارازیتی نقش بسیار مهمی را ایفا نموده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج بدست آمده حاصل از ساخت نتایج شبیه سازی را تایید می نماید.



(الف-۱۰)



(ب-۱۰)

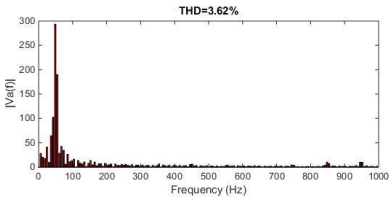


(ج-۱۰)

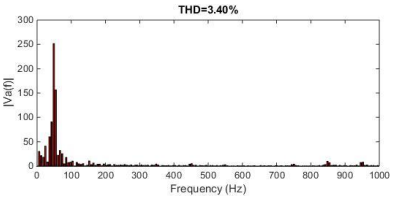
شکل ۱۰ : نتایج حاصل از ساخت ولتاژ ورودی سیم پیچ تحریک الف) بدون فیلتر ب) با فیلتر پسیو ج) با فیلتر اکتیو

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]

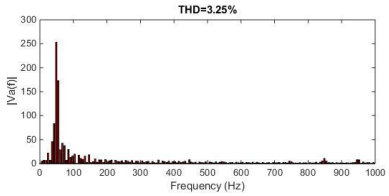
شکل (۱۱) نتایج حاصل از ساخت THD ولتاژ فاز"a" ژنراتور سنکرون را در حالتهای بدون فیلتر، با فیلتر پسیو و با فیلتر اکتیو نشان می دهد. کاهش THD به معنای کاهش پیک های فرکانس بالا می باشد. همان طور که ملاحظه می شود THD ولتاژ فاز"a" با فیلتر پسیو دارای کمترین مقدار است. بنابراین اثر خازنهای پارازیتی توسط فیلتر اکتیو به کمترین مقدار خود رسیده است.



(الف-۱۱)



(ب-۱۱)



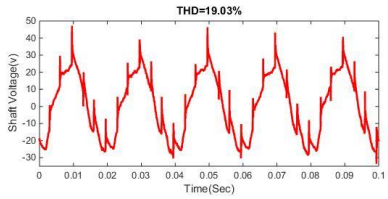
(ج-۱۱)

شکل ۱۱ : نتایج حاصل ازساخت ولتاژ فاز"a" ژنراتور سنکرون
الف) بدون فیلتر ب) با فیلتر پسیو ج) با فیلتر اکتیو

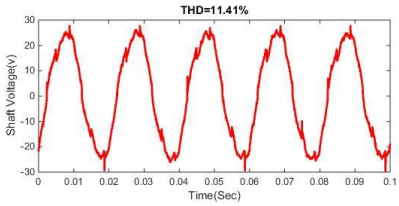
اندازه گیری ولتاژ شفت در هنگام چرخش رتور با استفاده از یک تسمه مسی که به دور رتور ژنراتور سنکرون پیچیده شده و آن تسمه نیز توسط یک فنر به بدنه محکم شده است انجام می شود. ولتاژ شفت نسبت به زمین آزمایشگاه توسط اسیلوسکوپ دیجیتال TDS2014 اندازه گیری شده است. در شکل (۱۲) ولتاژ های شفت نسبت به زمین آزمایشگاه در حالتهای بدون فیلتر، با فیلتر پسیو و با فیلتر اکتیو را نشان می‌دهد.

دامنه ولتاژ القایی شفت به فیلتر های بخش DC یکسوساز وابسته است. اسپایک های ناشی از روشن و خاموش شدن تریستورهای یکسوساز موجب ایجاد پیک های فرکانس بالا می شوند.با استفاده از مبدل باک این اسپایکها تبدیل به ریپلهایی با دامنه بسیار کم می شوند. اعمال این ولتاژ DC باریپل کم موجب کم اثر شدن خازنهای پارازیتی شده و دامنه ولتاژ القایی شفت را بطور موثری کاهش می دهد.

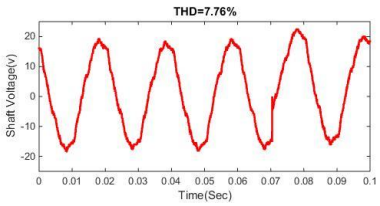
همانگونه که مشاهده گردید با مدولاسیون مناسب و کنترل ولتاژ خروجی مبدل باک می توان مقدار ولتاژ القایی شفت را به طور موثری کاهش داد. کنترل سیکل وظیفه سوئیچ مبدل باک باعث ثابت نگاه داشتن ولتاژ خروجی مبدل شده است.



(الف-۱۲)



(ب-۱۲)



(ج-۱۲)

شکل ۱۲ : ولتاژ شفت الف) بدون فیلتر ب) با فیلتر پسیو ج) با فیلتر اکتیو

در جدول (۴) مقادیر ولتاژ های شفت به همراه مقدار THD آن نشان داده شده است. مقدار دامنه ولتاژ شفت در حالتی که فیلتر در خروجی یکسوساز اعمال نشود به مقدار 80.8 ولت می رسد. در حالیکه با اعمال فیلتر پسیو این ولتاژ به مقدار 58.4 ولت کاهش می یابد. مقدار ولتاژ شفت با اعمال فیلتر اکتیو به مقدار 40.8 ولت کاهش یافته است. همانگونه که در شکل (الف-۱۲) مشاهده می شود پیک های فرکانس بالا با فرکانس 300Hz در یک پریود ولتاژ شفت حضور دارند.با اعمال فیلتر اکتیو این پیک های فرکانس بالا به کمترین مقدار خود رسیده است.

جدول ۴: مقایسه ولتاژ شفت و THD آن در حالتهای با و بدون فیلتر

موضوع	بدون فیلتر	با فیلتر پسیو	با فیلتر اکتیو
ولتاژ شفت (ولت)	80.8	58.4	40.8
THD ولتاژ شفت (٪)	19.3%	11.41 %	7.76%

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]

با استفاده از فیلتر می توان پیک های فرکانس بالای سوئیچینگ یکسوساز تریستوری را کاهش داد. در حقیقت با کاهش این پیک های فرکانس بالا مسیر خازنهای پارازیتی متصل شده به شفت ژنراتور سنکرون بای پس می گردند لذا ولتاژ القایی شفت کاهش می یابد. این نکته قابل ذکر است که مبدل باک به عنوان فیلتر اکتیو بیشترین اثر را در کاهش ولتاژ شفت داشته است. این موضوع در نتایج شبیه سازی و ساخت به اثبات رسیده است.

۸- نتیجه‌گیری

دلالیل ایجاد ولتاژ شفت چهار منبع می باشد که در مقدمه بیان شده است. سیستم تحریک استاتیک بیشترین تاثیر را در ایجاد ولتاژ القایی شفت دارد. بنابراین حفاظت ژنراتورهای سنکرون باکاهش ولتاژ القایی شفت و جریان یاتاقان به مقدار مجاز ضروری به نظر می رسد. در سیستم تحریک استاتیک روشن و خاموش شدن تریستورها باعث ایجاد پیک های فرکانس بالا در خروجی DC یکسوساز می شوند. اثر این پیک های فرکانس بالا موجب بروز خازنهای پارازیتی در ژنراتور سنکرون می شود. وقتی مسیر خازنهای پارازیتی به شفت ژنراتور بسته شوند، بر روی آن ولتاژ القا می گردد. در این مقاله برای کاهش ولتاژ شفت ژنراتور سنکرون از فیلترهای پسیو و اکتیو در خروجی یکسوساز تریستوری استفاده شده است.

با توجه به اینکه دامنه ولتاژ شفت به فیلتر بخش DC یکسوساز وابسته است لذا استفاده از فیلتری همچون مبدل باک می تواند ولتاژ شفت را به میزان قابل توجه ای کاهش دهد. فیلترهای پسیو و اکتیو هر دو درکاهش ولتاژشفت نقش دارند اما مبدل باک کنترل شده که به عنوان فیلتر اکتیو در خروجی یکسوساز سیستم تحریک قرار داده شده است بیشترین کاهش ولتاژشفت را داشته است. مبدل باک به دلیل رفتار مینیمم فاز آن نسبت به دیگر مبدلها ترجیح داده شده است. خازنهای پارازیتی به روش FEM آنالیز و محاسبه شده اند. نتایج شبیه سازی و ساخت نشان می دهد فیلتر اکتیو تاثیر بیشتری در کاهش ولتاژ شفت ژنراتور دارد. این کاهش ولتاژ منجر به افزایش طول عمر یاتاقانهای ژنراتورهای سنکرون می شود.

مراجع

[1] R.K. Golkhandan, M.T. Bina, M.A. Golkar, A complete excitation-shaft-bearing model to overcome the shaft induced voltage and bearing current, Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), (2011) 362-366.

[2] Xu Dianguo; Gao Qiang; Wang Wei, "Design of a Passive Filter to Reduce Common-Mode and Differential-Mode Voltage Generated by Voltage-Source PWM Inverter," in IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on , vol., no., pp.2483-2487, 6-10 Nov. 2006

[3] Gao Qiang; Xu Dianguo, "A New Approach to Mitigate CM and DM Voltage dv/dt Value in PWM Inverter Drive Motor Systems," in Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE , vol., no., pp.1212-1216, Feb. 25 2007-March 1 2007

[4] Akagi, H.; Tamura, S., "A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor," in Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.21, no.5, pp.1459-1469, Sept. 2006

[5] Akagi, H.; Tamura, S., "A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current from an Inverter-Driven Motor," in Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th , vol., no., pp.2442-2450, 16-16 June 2005

[6] Kalaiselvi, J.; Srinivas, S., "Passive common mode filter for reducing shaft voltage, ground current, bearing current in dual two level inverter fed open end winding induction motor," in Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 International Conference on , vol., no., pp.595-600, 22-24 May 2014

[7] Esmaeli, A., "Mitigation of the adverse effects of PWM inverter through passive cancellation method," in Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2006. ISSCAA 2006. 1st International Symposium on , vol., no., pp.5 pp.-751, 19-21 Jan. 2006

[8] Pairodamonchai, P.; Suwankawin, S.; Sangwongwanich, S., "Design and Implementation of a Hybrid Output EMI Filter for High-Frequency Common-Mode Voltage Compensation in PWM Inverters," in Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.45, no.5, pp.1647-1659, Sept.-oct. 2009

[9] Hyypio, D., "Mitigation of bearing electro-erosion of inverter-fed motors through passive common-mode voltage suppression," in Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.41, no.2, pp.576-583, March-April 2005

[10] A. Kumar Datta, M. Dubey, S. Jain, Modelling and Simulation of Static Excitation System in Synchronous Machine Operation and Investigation of Shaft Voltage, Advances in Electrical Engineering journal, (2014).

[11] U.T. shami, H. Akagi, Experimental Discussions on a Shaft End-to-End Voltage Appearing in an Inverter-Driven Motor, IEEE Trans. Power Electron, 24 (6) (2009) 1532-1540.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]

[12] A. Muetze, On a new type of inverter-Induced bearing current in large drives with one journal Bearing, IEEE Trans. Ind. Appl. 46 (1) (2010) 240-248.

[13] M.E. Adabi, A. Vahedi, A survey of shaft voltage reduction strategies for induction generators in wind energy applications, Renewable Energy, 50 (2013) 177-187.

[14] A. Muetze, A. Binder, Calculation of influence of insulated bearings and insulated inner bearing seats on circulating bearing currents in machines of inverter-based drive systems, IEEE Trans. Ind. Appl. 42 (4) (2006) 965-972.

[15] F. Wang, Motor shaft voltages and bearing currents and their reduction in multilevel medium-voltage PWM voltage-source-inverter drive applications, IEEE Trans. Ind. Appl.36 (5), (2000) 1336-1341.

[16] X. Dianguo, G. Qiang, W. Wei, Design of a passive filter to reduce common-mode and differential-mode voltage generated by voltage-source PWM inverter, IEEE Industrial Electronics, IECON (2006).

[17] W. Sanmin, N. Zargari, W. Bin, S. Rizzo, Comparison and mitigation of common mode voltage in power converter topologies, Industry Applications Conference, (2004). 3 1852-1857 vol.3.

[18] U.T. Shami, H. Akagi, Identification and discussion of the origin of a shaft end-to-end voltage in an inverter-driven motor, IEEE Trans. Power Electron, 25 (6) (2010) 1615-1625.

[19] Y. Isomura, K. Yamamoto, S.Morimoto, T. Maetani,; A. Watanabe, K. Nakano, Study of the further reduction of shaft voltage of brushless DC motor with insulated rotor driven by PWM inverter, Power Electronics and Drive Systems (PEDS), (2013), 1184-1189.

[20] F.Zare, Practical approach to model electric motors for electromagnetic interference and shaft voltage analysis, IET Electr. Power Appl. 4 (9) (2010) 727-738.

[21] J.Adabi, F.Zare, A. Ghosh, End-winding effect on shaft voltage in AC generators, Power Electronics and Applications, (2009). 10, 8-10.

[22] D. Busse, J.Erdman, R.J. Kerkman, D. Schlegel, G. Skibinski, System electrical parameters and their effects on bearing currents, IEEE Trans. Ind. Appl.33 (2) (1997) 577-584.

[23] W. H. Hayt, Engineering Electromagnetics, 5th ed. New York:McGraw-Hill, 1989.

[24] Hao-Ran Wang; Guo-Rong Zhu; Dong-Hua Zhang; Wei Chen; Yu Chen"On The Practical Design of a Single-Stage Single-Switch Isolated PFC Regulator Based on Sliding Mode Control" IEEE conf.Power Electron, vol.1, pp.719-724, 2012.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1394.9.4.3.2]