

دانشگاه صنعتی شاهرود

حوزه معاونت پژوهشی

گزارش پایانی

طرح پژوهشی

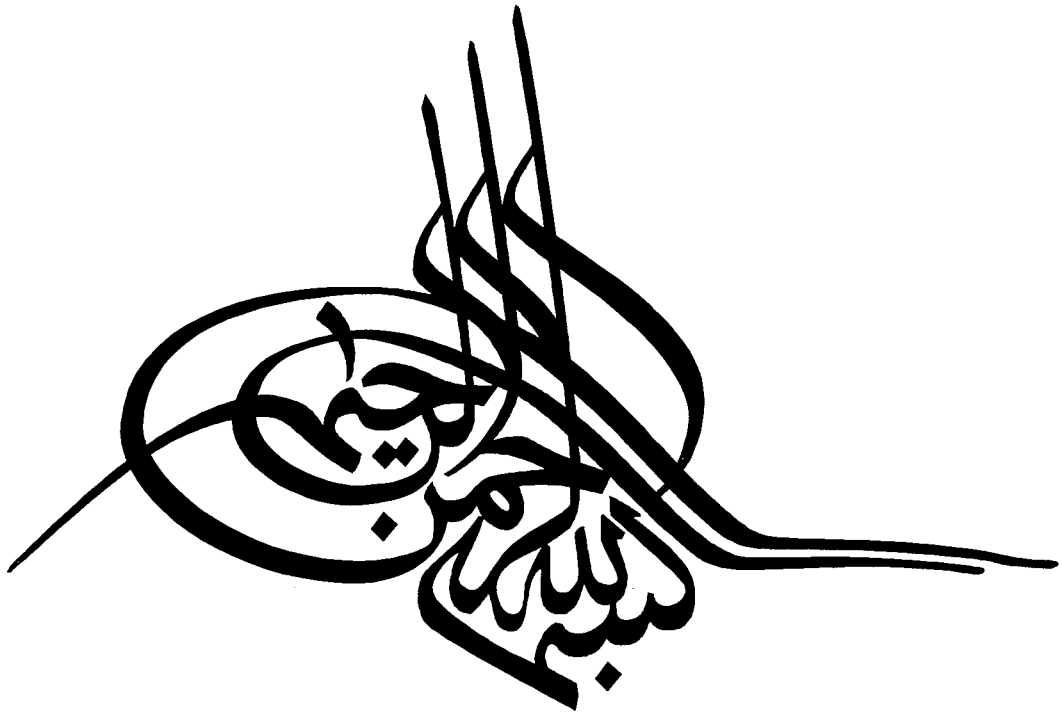
عنوان طرح:

**طراحی و مدلسازی سیستم تغذیه AVR برای ژنراتورهای
سنکرون بدون جاروبک**

کد طرح: ۱۳۰۱۱

دی ماه ۱۳۸۳

مجری طرح: احمد دارابی





حوزه معاونت پژوهشی

گزارش پایانی

طرح پژوهشی

عنوان طرح:

طراحی و مدلسازی سیستم تغذیه AVR برای ژنراتورهای سنکرون بدون جاروبک

کد طرح: ۱۳۰۱۱

دی ماه ۱۳۸۳

مجری طرح: احمد دارابی

این طرح با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است و تاریخ
های تصویب و خاتمه آن به ترتیب ۸۳/۸/۲۵ و ۱۳۸۳/۱۰/۲۷ می باشد

فهرست

فصل اول: روشهای تغذیه AVR

- ۱-۱ مقدمه ۱
- ۲-۱ تغذیه از طریق ترمینال ژنراتور ۳
- ۳-۱ تغذیه با استفاده از ژنراتور مغناطیس دائم ۴
- ۴-۱ تغذیه با استفاده از سیم پیچی های کمکی ۴

فصل دوم: سیم پیچی های کمکی تغذیه AVR

- ۱-۲ هارمونیک های شار ۶
- ۲-۲ ساختار سیم بندی ژنراتور ۷
- ۳-۲ طرح سیم پیچ های کمکی ۸

فصل سوم: مدل اجزاء محدود و شبیه سازی سیستم

- ۱-۳ مدل FE و محاسبه پارامترهای ماشین ۱۱
- ۲-۳ پارامترهای محاسبه شده ماشین ۱۳
- ۳-۳ شبیه سازی سیستم در محیط MATLAB ۱۹

فصل چهارم: نتایج شبیه سازی

- ۱-۴ نتایج شبیه سازی برای بار کامل و ضریب توان 0.8 پس فاز ۲۲
- ۲-۴ نتایج شبیه سازی برای بار کامل و ضریب توان ۱ ۲۵
- ۳-۴ نتایج شبیه سازی برای اتصال کوتاه سه فاز ۲۶
- ۴-۴ نتایج شبیه سازی برای بار نامتعادل دو فاز ۲۷
- ۵-۴ نتایج ۳۳
- ۳۵ منابع و مراجع ۳۵

علائم و اختصارات

AVR	رگولاتور یا تنظیم کننده ولتاژ اتوماتیک
ac	جریان متناوب
dc	جریان مستقیم
FE	اجزاء محدود
PID	کنترل کننده تناسبی ، انترگرال گیر و مشتق گیر
PMG	ژنراتور مغناطیس دائم
PWM	مدولاسیون عرض پالس
THD	اعوجاج هارمونیک کل
f	فرکانس
$[i]$	بردار جریان
i_a	جریان سیم پیچ فاز a
i_b	جریان سیم پیچ فاز b
i_c	جریان سیم پیچ فاز c
i_f	جریان سیم پیچ تحریک
$[i_{fabc}]$	بردار جریان سیم پیچی تحریک و سه فاز استاتور
i_{h1}	جریان سیم پیچی کمکی $h1$
i_{h3}	جریان سیم پیچ کمکی $h3$
$[L(\theta)]$	ماتریس اندوکتانس سیم پیچی های ماشین
L_a	اندوکتانس بار قرار گرفته در فاز a
L_b	اندوکتانس بار قرار گرفته در فاز b
L_c	اندوکتانس بار قرار گرفته در فاز c
$[L_{fabc}(\theta)]$	ماتریس اندوکتانس بین سیم پیچی های تحریک و سه فاز استاتور

$L_{kj}(\theta)$	اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ k و j بر حسب زاویه θ
$[L_l]$	ماتریس 4×4 قطری اندوکتانس بار با سطر و ستون اول اضافی صفر
$[L_{le}]$	ماتریس قطری اندوکتانس ورودی تحریک و اندوکتانس های پراکندگی فازهای استاتور
l_f	اندوکتانس پراکندگی و ورودی سیم پیچی تحریک
l_s	اندوکتانس پراکندگی هر فاز سیم پیچی استاتور
p	تعداد قطب ها
R_a	مقاومت بار قرار گرفته در فاز a
R_b	مقاومت بار قرار گرفته در فاز b
R_c	مقاومت بار قرار گرفته در فاز c
$[R_l]$	ماتریس 4×4 قطری مقاومت بار با سطر و ستون اول اضافی صفر
R_o	مقاومت سیم صفر
r_f	مقاومت سیم پیچی تحریک
$[r_{fabc}]$	ماتریس قطری 4×4 مقاومت سیم پیچی تحریک و سه فاز استاتور
r_s	مقاومت هر فاز سیم پیچی استاتور
t_p	گام قطب
$[U_l]$	ماتریس مربع با همه عناصر برابر با یک
v_f	ولتاژ تحریک
$[v_{fabc}]$	بردار ولتاژ ترمینال سیم پیچی تحریک و منابع ولتاژ سری با بار در هر فاز استاتور
v_{h1}	ولتاژ سیم پیچی کمکی $h1$ تغذیه AVR
v_{h3}	ولتاژ سیم پیچی کمکی $h3$ تغذیه AVR
w	گام کلاف
θ	زاویه مکانیکی
ω	سرعت زاویه ای روتور
$[\lambda]$	بردار شار ارتباطی سیم پیچی های ماشین

λ_a	شار ارتباطی سیم پیچ فاز a
λ_b	شار ارتباطی سیم پیچ فاز b
λ_c	شار ارتباطی سیم پیچ فاز c
λ_f	شار ارتباطی سیم پیچ تحریک
λ_{h1}	شار ارتباطی سیم پیچی کمکی $h1$
λ_{h3}	شار ارتباطی سیم پیچ کمکی $h3$
Ω	اهم

فصل اول

روشهای تغذیه AVR

۱-۱ مقدمه

در سیستم تحریک قدیمی ماشین سنکرون، جریان سیم پیچ میدان قرار گرفته در روتور از یک منبع یا ژنراتور dc و توسط حلقه های لغزان تامین می شود. به علت هزینه بالا و نگهداری مشکل تحریک dc این روش تحریک بتدریج در بسیاری از ماشینها با تحریک ac جایگزین شده است. در تحریک ac خروجی یکسو ساز قرار گرفته در ترمینال های ماشین تحریک توسط حلقه های لغزان برای تغذیه میدان ماشین اصلی بکار گرفته می شود. سیستم های تحریک بدون جاروبک از دهه ۱۹۳۰ مطرح شدند اما اندازه و مقدار نامی ادوات یکسو ساز موجود در آن زمان یکی از محدودیت های استفاده از این روش تحریک و روش تحریک ac با حلقه های لغزان بود. در ژنراتور های standby که در مراکز هم چون بیمارستانها بعنوان ژنراتور اضطراری به مدت طولانی و بی بار مورد استفاده قرار می گیرند اگر نگهداری دقیق و دائم انجام نگیرد خرابی کنتاکتهای لغزشی باعث از کار افتادن ژنراتورها می شود. از دهه ۱۹۵۰ با گسترش نیمه هادی های سیلیکون و ژرمانیوم و امکان ساخت یکسو سازهای کوچک با توان بالا، تحریک ac بدون جاروبک به عنوان یک موضوع با اهمیت و اقتصادی مطرح شد.

بطور قاطع تقریبا همه ژنراتورهای کوچک جدید شامل یک محرکه اولیه از نوع احتراق داخلی (معمولا موتور دیزل) با گاورنر، کوپل شده به یک آلترناتور بدون جاروبک می باشند [۱]. آلترناتور بدون جاروبک خود شامل یک آلترناتور اصلی، یک ماشین تحریک، یک یکسوساز سه فاز و یک AVR نوع آنالوگ است [۱،۲]. معمولا AVR شامل یک بخش تغذیه، یک بلوک PID و یک خروجی PWM است که خروجی PWM میدان آلترناتور تحریک را تغذیه می کند [۳]. فرکانس خروجی PWM متناسب با فرکانس ولتاژ ترمینال آلترناتور اما دامنه آن با منبع ولتاژ تغذیه AVR تعیین می شود. آلترناتور اصلی عموما از نوع قطب برجسته و معمولا چهار قطبی است و آلترناتور تحریک که میدان آلترناتور اصلی را بوسیله یک پل دیودی تغذیه می کند یک ماشین چند قطبی با طرح معکوس و یک روتور سه فاز قرار گرفته روی محور مشترک با ژنراتور اصلی می باشد [۴]. پل دیودی سه فاز قرار گرفته در ترمینال ماشین تحریک نیز در محور مشترک جا سازی می شود و خروجی آن به سیم پیچی میدان اصلی وصل می گردد. هنگامیکه یک ژنراتور حالت سنکرونیسم خود را از دست می دهد و یا در حالت لغزش قطب ها (Pole slipping) قرار می گیرد ولتاژهای معکوس بسیار بزرگ می تواند در دیودها ظاهر شوند. برای حفاظت سیستم یک وریستور به دو سر خروجی یکسو ساز به منظور محدود کردن این ولتاژها در سطح مطمئن متصل می شود. یکسو سازهای تریستوری قابل کنترل نیز برای اصلاح عملکرد گذرای دینامیکی گسترش یافته اند اما مشکل انتقال سیگنال های کنترل به روتور بدون حلقه های لغزان استفاده از آنها را محدود کرده است.

تغذیه AVR می تواند به سه صورت تامین شود:

- (۱) به وسیله یک ترانس کاهنده مستقیما از ترمینال اصلی ژنراتور
- (۲) با استفاده از یک ژنراتور آهنربای دائم (Permanent Magnet Generator) یا PMG قرار گرفته روی همان محور ژنراتور اصلی و
- (۳) با سیم پیچهای کمکی قرار گرفته در شیارهای استاتور ژنراتور اصلی

۱-۲ تغذیه از طریق ترمینال ژنراتور

AVR، ولتاژ خروجی ژنراتور را با تغییر جریان میدان ماشین تحریک کنترل می کند. جریان مورد نیاز میدان ماشین تحریک به مراتب کمتر از جریان سیم پیچی میدان اصلی است. تغذیه AVR، مستقیماً یا با استفاده از یک ترانس کاهنده از ترمینال خروجی ژنراتور ساده ترین و ارزانه ترین روش تهیه تحریک می باشد. این سیستم خود تحریک وابسته به شار پسماند برای ایجاد ولتاژ اولیه است لذا در این روش نیاز به استفاده از هسته ساخته شده از مواد با محتویات سیلیکون کمتر می باشد یا اینکه در سطح قطب های ماشین تحریک، آهنربا های دائم قرار داده می شود. هنگامی که ولتاژ حاصل از پسماند کم است، مدار تشدید قابل تنظیم در AVR به بوجود آمدن ولتاژ اولیه کمک می کند. به هر حال در حالتی که پسماند از بین می رود (به عنوان مثال اگر روتور از استاتور به مدت طولانی به منظور نگهداری جدا شود "Field Flashing") یک باتری معمولاً برای لحظه شروع لازم است.

یکی از معایب سیستم خود تحریک نبودن ولتاژ لازم برای تغذیه AVR هنگام اتصال کوتاه در ترمینال ژنراتور و کاهش سطح جریان اتصال کوتاه می باشد. بنابراین برای تشخیص خطا ممکن است روش دیگری غیر از سیستم حفاظت در برابر اضافه جریان لازم شود. بعلاوه در اثنای راه اندازی موتور، ولتاژ خروجی ژنراتور ممکن است شدیداً افت کند بطوریکه AVR نتواند جریان میدان را به اندازه کافی افزایش داده و به تبع آن ولتاژ لازم فراهم و موتور راه اندازی شود.

همانطور که گفته شد در خیلی از موارد ولتاژ ترمینال یک منبع قابل اعتماد برای تغذیه AVR نمی باشد. بطور کاملتر هنگامی که بار ژنراتور بصورت پله ای افزایش می یابد و ولتاژ ترمینال در طول گذرایی افت می کند برای جبران افت ولتاژ (Voltage Recovery)، باید متوسط ولتاژ PWM تغذیه کننده میدان ماشین تحریک افزایش یابد. از طرف دیگر متوسط خروجی PWM وابسته به Duty Cycle یا نسبت Mark/Space و دامنه آن می باشد. ولتاژ تغذیه AVR دامنه PWM را تعیین می کند و AVR نسبت Mark/Space خروجی PWM را کنترل می کند. در حالتی که ولتاژ ترمینال برای تغذیه AVR استفاده می شود با کاهش ولتاژ ترمینال دامنه خروجی PWM نیز

در هنگام بار گذاری ژنراتور کاهش می یابد و لذا لازم است نسبت Mark/Space بیشتر افزایش یابد تا سهم افت دامنه PWM در تثبیت ولتاژ ترمینال را هم جبران کند. بالعکس هنگام برداشتن بار و افزایش ولتاژ، نسبت Mark/Space زیاد تر از حالت تغذیه ثابت باید کاهش یابد. بعد از اعمال و یا برداشتن بار، AVR می تواند سریعتر ولتاژ ترمینال را تنظیم نماید به شرط اینکه تغییرات ولتاژ ورودی متوسط AVR نسبت به مثلا مقدار مؤثر ولتاژ ترمینال معکوس می بود. واضح است که این شرط هرگز اتفاق نمی افتد هنگامی که خود ولتاژ ترمینال مستقیما به عنوان تغذیه AVR بکار رفته است. توجه شود که تنظیم سریع ولتاژ در سیستم قدرت از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۵].

۳-۱ تغذیه با استفاده از ژنراتور مغناطیس دائم

روش بسیار گرانتر، استفاده از ژنراتور مغناطیس دائم (PMG) و تغذیه جداگانه AVR می باشد. این روش تغذیه باعث اصلاح عملکرد راه اندازی موتور شده و همچنین سطح جریان خطای زیاد را برای تشخیص خطا فراهم می نماید. به هر حال این روش احتیاج به ژنراتور دیگر و اجزاء اضافی دارد و بنابراین به پیچیدگی سیستم و بالا رفتن قیمت تمام شده منجر می شود.

۴-۱ تغذیه با استفاده از سیم پیچی های کمکی

استفاده از سیم پیچ های کمکی قرار گرفته در شیار های استاتور موضوع این گزارش می باشد. در این روش کم هزینه اگر طراحی کوئل ها به طرز مناسب انجام گرفته باشد سیستم تغذیه بسیار مطمئن برای AVR می تواند فراهم شود. در این روش ولتاژ کافی برای تغذیه AVR در همه شرایط عملکرد از جمله در حالت اتصال کوتاه ماشین و راه اندازی موتور بوجود می آید. عملکرد بسیار جالب دیگر این کوئل های کمکی تامین سطح ولتاژ بزرگتر برای AVR هنگام افت ولتاژ شدیدتر در ترمینال ژنراتور می باشد. این عملکرد کوئل ها هماهنگ با مکانیزم و وظیفه کنترلی AVR می باشد. ضمنا انتظار می رود که این سیم پیچی های کمکی ساده و کم هزینه قرار گرفته

شده در شیارهای استاتور مشابه عملکرد جانبی مطلوب دمپرها در روتور [۶،۷] باعث کاهش هارمونیک های شار در طرف استاتور ماشین شود.

در این گزارش ابتدا طرح سیم پیچهای کمکی برای یک ژنراتور سه فاز، ۴ قطب، ۵۰ هرتز، ۳۸۰ ولت با سیم پیچی استاتور اتصال ستاره، دو طبقه متمرکز در ۳۶ شیار و گام کلاف ۱۲۰ درجه معرفی شده و با استفاده از روش اجزاء محدود (FE) [۸]، و نرم افزار مهندسی Electromagnetic SLIM [۹]، مش های مورد نیاز و مدل اجزاء محدود سیستم ژنراتور تحت بررسی ساخته میشود. سپس مجموعه ای از محاسبات میدان مغناطیسی در موقعیت ها و شرایط تحریک مختلف کوئل های ژنراتور انجام میگردد. با استفاده از نتایج بدست آمده از این محاسبات FE و بدنبال آن یکسری محاسبات منظم دیگر پارامترهای فضایی لازم سیستم محاسبه می شوند. سرانجام پارامترهای محاسبه شده در یک شبیه سازی گذرای در محیط MATLAB مورد استفاده قرار گرفته و سیستم تحت شرایط مختلف بار، مورد تحلیل و عملکرد سیم پیچهای کمکی مورد ارزیابی قرار می گیرد. همه شبیه سازی های انجام گرفته کارآیی و سازگاری این سیستم تغذیه AVR را نشان می دهند.

می گیرد. همه شبیه سازی های انجام گرفته کارآیی و سازگاری این سیستم تغذیه AVR را نشان می دهند.

فصل دوم

سیم پیچی های کمکی تغذیه AVR

۱-۲ هارمونیک های شار

علیرغم تمهیدات و دقتهای زیاد در طراحی ماشین، وجود هارمونیکهای مختلف شار در بخش استاتور ماشین اجتناب ناپذیر می باشد. عوامل ایجاد این هارمونیکها متفاوت بوده اما میتوان آنها را به سه عامل ساختار ماشین، اشباع آهن و بارهای غیر خطی منتسب نمود. اصطلاح هارمونیکهای فضایی و زمانی نیز مربوط به این عوامل می باشد.

وجود هارمونیکهای شار اثرات مخرب کاملا متفاوت روی عملکرد ژنراتور دارد. هارمونیکهای شار علاوه بر ایجاد اعوجاج شکل موج ولتاژ باعث تحمیل تلفات اضافی از جمله تلفات حلقه های جزئی هیستریز (Minor loop or Parasitic loss) میشوند. این هارمونیکها همچنین باعث نوسانات گشتاور، نویز صوتی و تلفات آهن در روتور بخصوص در ناحیه سطح قطبها (Pole tip) میشوند ضمن اینکه پیچیدگی تحلیل و آنالیز ماشین و محاسبه تلفات را نیز مضاعف می کند [۱۰].

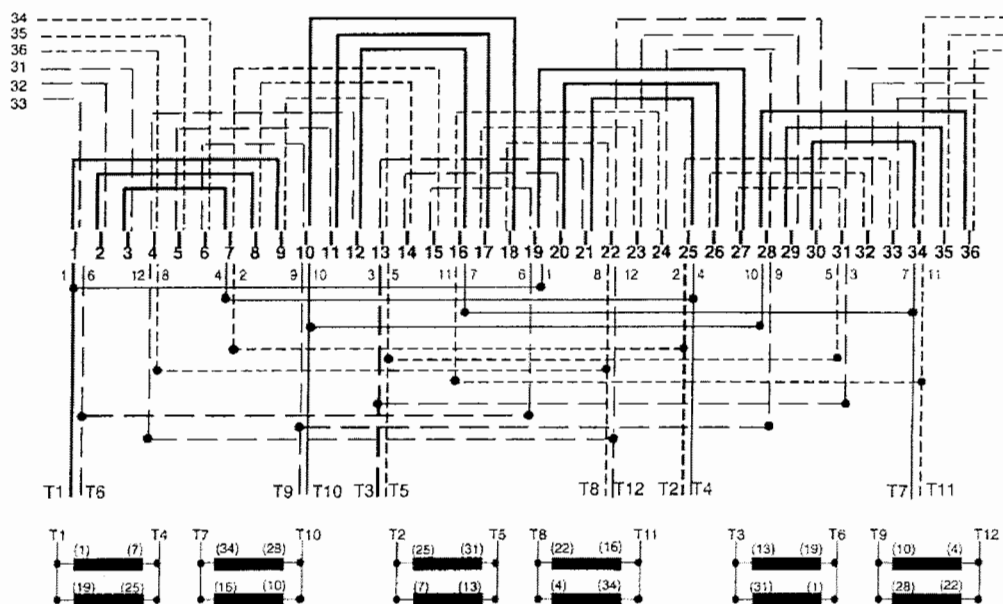
هارمونیک حاصل از شیارها معمولا بزرگترین مرتبه هارمونیک فضایی در آلترناتور می باشد و به عنوان بخشی از هارمونیکهای ساختار (هارمونیکهای فضایی) میتواند بسیار مخرب باشد که عموما اثرات آن روی ولتاژهای القایی در کویلهای روتور و استاتور (Slot Ripples)، با مورب نمودن (Skew) یکی از بخشهای استاتور و یا روتور (معمولا روتور) بطور قابل توجه تعدیل میشوند. این اریب معمولا به اندازه یک گام شیار استاتور می باشد. بخشی از هارمونیکهای فرد دیگر در ولتاژ

استاتور را نیز میتوان با انتخاب مناسب گام کلافها کاهش داد. باید توجه نمود که تمهیدات فوق و عموماً هر تمهید دیگر مستقیماً برای حذف و یا کاهش هارمونیکها در ولتاژ کوپلها، نه شارهای محلی می باشد هر چند در شرایط عملکرد مختلف، آنها بطور غیر مستقیم روی شارهای محلی نیز مؤثر می باشند. به همین دلیل ولتاژهای فاز استاتور اطلاعات کاملی را از هارمونیکهای شار محلی فراهم نمی نمایند و لذا کویل‌های جستجوی دیگر (Search Coil) به کرات طراحی و مورد استفاده قرار میگیرند.

نقش میله‌های میراکننده (Damper bars) روتور در کاهش هارمونیکهای ولتاژ استاتور [۷]، و همچنین شیفت تلفات آهن روتور به تلفات اهمی در میراکننده‌های ژنراتورهای کوچک [۶]، اثبات شده است. این نقش فرعی میراکننده‌ها الهام بخش در طراحی سیستم مناسب در قسمت استاتور برای تغذیه AVR می باشد.

۲-۲ ساختار سیم بندی ژنراتور

استاتور ژنراتور تحت بررسی دارای ۳۶ شیار می باشد و سیم بندی آن متمرکز و طراحی شده برای حذف هارمونیک سوم ولتاژ فاز با گام کسری $2/3$ به صورت شکل ۱ می باشد.



شکل (۱) سیم بندی استاتور آلترناتور ۴ قطبی تحت شبیه سازی

دلیل استفاده از گام کلاف 2/3 قابلیت و امکان بکارگیری ژنراتور بصورت اتصال مثلث می باشد هر چند سیستم در حالت عادی عموماً با اتصال ستاره کار می کند. شکل ۱ آرایش سیم بندی استاتور چهارقطبی تحت شبیه سازی را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می شود هر فاز استاتور از چهار کویل مشابه تشکیل شده است که دو به دو موازی و نهایتاً به صورت سری در می آیند.

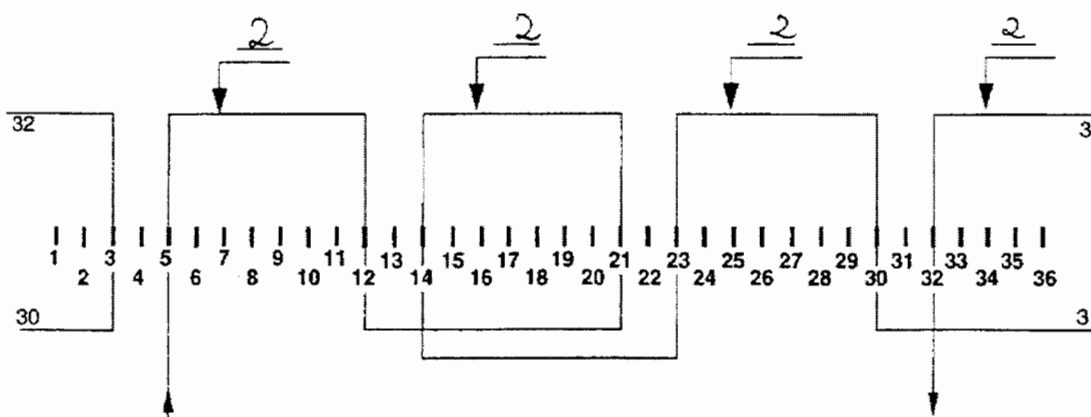
۳-۲ طرح سیم پیچ های کمکی

امروزه روش اجزاء محدود کاربردهای گسترده ای در تحلیل و طراحی ماشین های الکتریکی پیدا کرده است. بخصوص در هر مسئله طراحی ماشین های الکتریکی که روش مدون و دقیقی برای آن در دسترس نیست، می توان با استفاده از روش اجزاء محدود و با شروع از یک طرح مقدماتی و به روش سعی و خطا به یک طرح جامع و ایده آل دست یافت. روش اجزاء محدود این امکان را برای طراحی بوجود می آورد که طرح خود را با استفاده از این روش مورد تحلیل قرار داده و عملکرد واقعی آن را مشاهده نماید و در صورت لزوم طرح اولیه را اصلاح نماید.

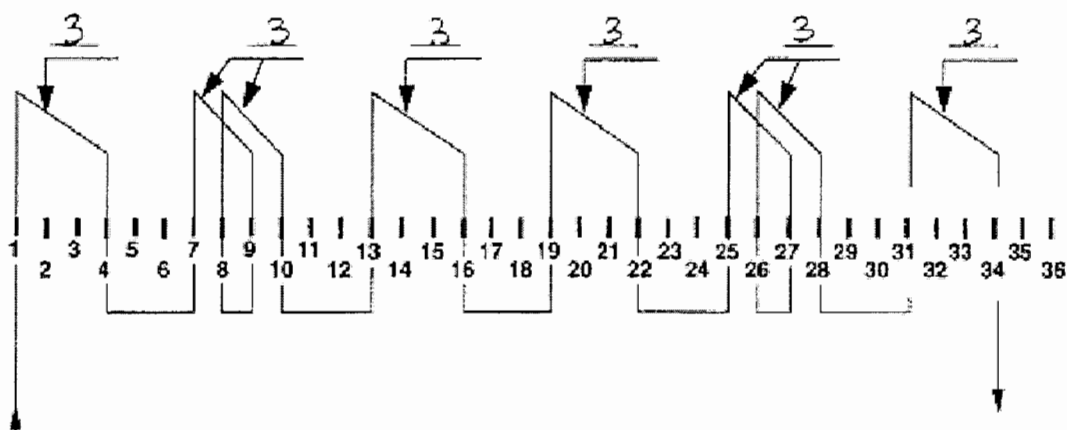
کویل های تغذیه AVR که در این پروژه مورد تحلیل و بررسی عملکرد قرار می گیرند بر این اساس طراحی شده اند که هارمونیک اصلی و دیگر هارمونیک های غالب شار یک ماشین سنکرون را مورد استفاده قرار دهند. نوع و میزان هارمونیکهای شار در شرایط عملکرد مختلف ژنراتور متفاوت می باشند اما در غیاب هارمونیک شیار، هارمونیکهای ۱، ۳، ۵ و ۷ هارمونیکهای غالب با نسبتهای متفاوت در شرایط عملکرد مختلف می باشند. بنابراین کویل های تغذیه AVR می بایست دارای ضریب گام های مناسب برای این هارمونیک ها باشند. ضریب گام سیم پیچی برای هارمونیک n از

$$\text{رابطه} \sin\left(n\frac{w}{t_p}\frac{\pi}{2}\right) \text{ بدست می آید که در آن } w \text{ گام کلاف و } t_p \text{ گام قطب می باشد.}$$

یک سیستم متشکل از دو کویل که هارمونیک های شار را مورد استفاده قرار می دهند می تواند در همه شرایط عملکرد به عنوان تغذیه AVR بکار رود. انتخاب ولتاژ یک کویل در هر لحظه توسط یک پل یکسو ساز دیودی دو فاز قرار گرفته در ورودی AVR انجام می گیرد و AVR یک



شکل ۲) سیم پیچی هارمونیک های ۱ و ۷ برای تغذیه AVR (کوئل h1)



شکل ۳) سیم پیچی هارمونیک های ۳ و ۵ برای تغذیه AVR (کوئل h3)

فصل سوم

مدل اجزاء محدود و شبیه سازی سیستم

۳-۱ مدل FE و محاسبه پارامترهای ماشین

آلترناتور بکار رفته در این گزارش، یک آلترناتور قطب برجسته ۳ فاز ۳۰ کیلو ولت آمپری، ۳۸۰ ولت، ۴ قطب و ۵۰ هرتز ساخت شرکت فرانسوی LEROY SOMER می باشد که ابعاد فیزیکی و جزئیات سیم بندی آن در دسترس می باشد. مقاومت هر فاز استاتور 0.199Ω و مقاومت سیم پیچ تحریک میدان 3.7Ω می باشد.

برای شرایط عملکرد نرمال القای متقابل بین سیم پیچ میدان اصلی (f)، سه سیم پیچ مربوط به سه فاز (a, b, c) استاتور و دو سیم پیچ کمکی ($h1, h3$) تغذیه AVR آلترناتور، با یک رابطه خطی بین شارهای ارتباطی سیم پیچ ها و جریان ها بصورت زیر تعریف می شود.

$$[\lambda] = [\theta] \times [] \quad (1-3)$$

بطوریکه:

$$[\lambda] = [\lambda_f \quad \lambda_a \quad \lambda_b \quad \lambda_c \quad \lambda_{h1} \quad \lambda_{h3}]^T \quad (2-3)$$

$$[i] = [i_f \quad i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_{h1} \quad i_{h3}]^T \quad (3-3)$$

$$[L(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{ff}(\theta) & L_{fa}(\theta) & L_{fb}(\theta) & L_{fc}(\theta) & L_{fh1}(\theta) & L_{fh3}(\theta) \\ L_{af}(\theta) & L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) & L_{ah1}(\theta) & L_{ah3}(\theta) \\ L_{bf}(\theta) & L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) & L_{bh1}(\theta) & L_{bh3}(\theta) \\ L_{cf}(\theta) & L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) & L_{ch1}(\theta) & L_{ch3}(\theta) \\ L_{h1f}(\theta) & L_{h1a}(\theta) & L_{h1b}(\theta) & L_{h1c}(\theta) & L_{h1h1}(\theta) & L_{h1h3}(\theta) \\ L_{h3f}(\theta) & L_{h3a}(\theta) & L_{h3b}(\theta) & L_{h3c}(\theta) & L_{h3h1}(\theta) & L_{h3h3}(\theta) \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

بطوریکه $L_{kj}(\theta)$ برای $k = f, a, b, c, h1, h3$ و $j = f, a, b, c, h1, h3$ اندوکتانس های خودی و

متقابل سیم پیچی ها، و θ زاویه مکانیکی روتور از یک محور ثابت می باشد و:

$$k = f, a, b, c, h1, h3 \text{ و } j = f, a, b, c, h1, h3 \text{ برای } L_{kj}(\theta) = L_{jk}(\theta)$$

$$L_{bb}(\theta) = L_{aa}\left(\theta - \frac{4\pi}{3p}\right)$$

$$L_{cc}(\theta) = L_{aa}\left(\theta - \frac{8\pi}{3p}\right)$$

$$L_{bc}(\theta) = L_{ab}\left(\theta - \frac{4\pi}{3p}\right)$$

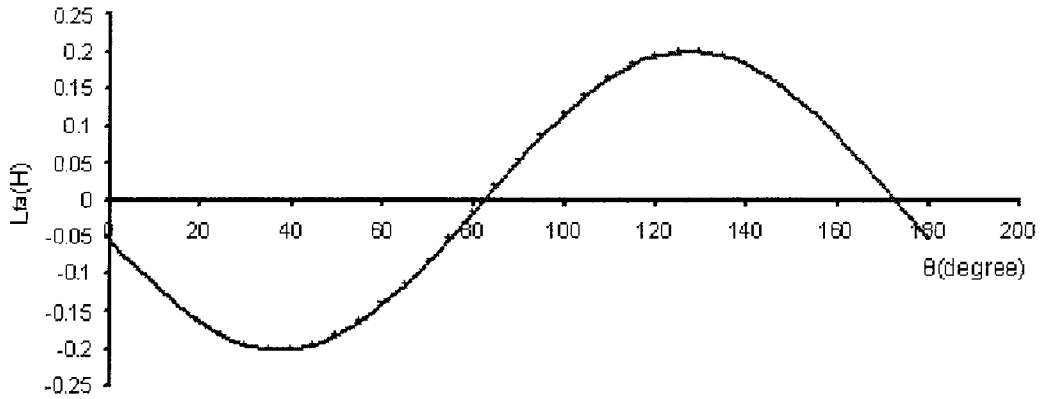
$$L_{ca}(\theta) = L_{ab}\left(\theta - \frac{8\pi}{3p}\right) \quad (5-3)$$

$$L_{bf}(\theta) = L_{af}\left(\theta - \frac{4\pi}{3p}\right)$$

$$L_{cf}(\theta) = L_{af}\left(\theta - \frac{8\pi}{3p}\right)$$

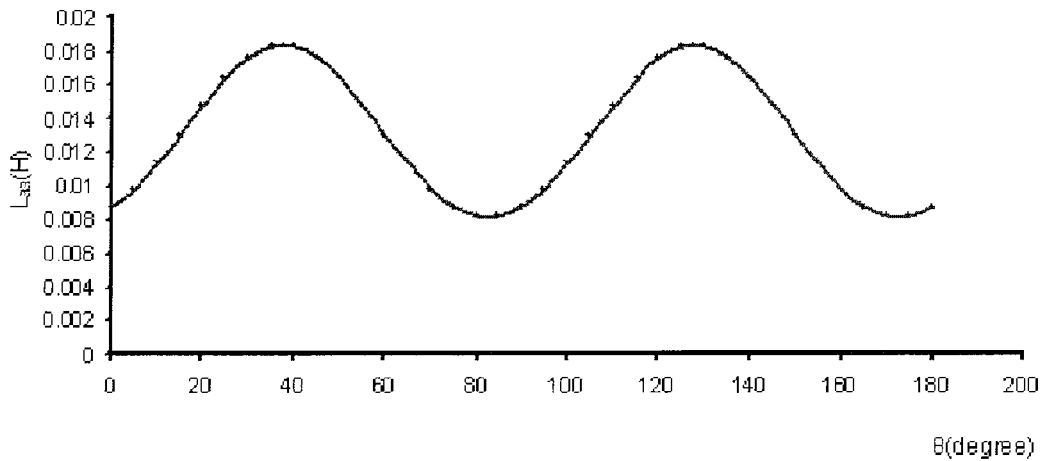
بطوریکه p تعداد قطب ها است.

به علت ساختار ژنراتور و توزیع غیر سینوسی سیم پیچی ها، عبارات ساده سینوسی نمی توانند به دقت پارامترهای ماشین را توصیف کنند. پارامترهای آلترناتور می توانند با استفاده از روش FE به دقت تعیین شوند. در استفاده از FE دو بعدی، ابتدا برای به حساب آوردن اریب بودن روتور، ماشین به دو لایه تقسیم می شود یعنی دو مش مناسب ماشین تولید می شود بطوریکه اگر در یکی از مش ها مرکز دهانه یک شیار خاص درست در مرکز قطب باشد در مش دیگر مرکز دندانه مجاور همان شیار در مرکز قطب روتور قرار گیرد. سپس یکی از بوبین ها مثلا k با یک جریان معین تغذیه شده موقعی که کوپل های دیگر مدار باز می باشند. آنگاه یک تحلیل میدان استاتیک برای هر مش انجام می گیرد و مقدار پتانسیل مغناطیسی در مرکز طرفین یکایک کوپل ها بدست می آید. با استفاده از متوسط مقادیر حاصل از تحلیل دو مش برای طرفین هر کلاف، شار ارتباطی



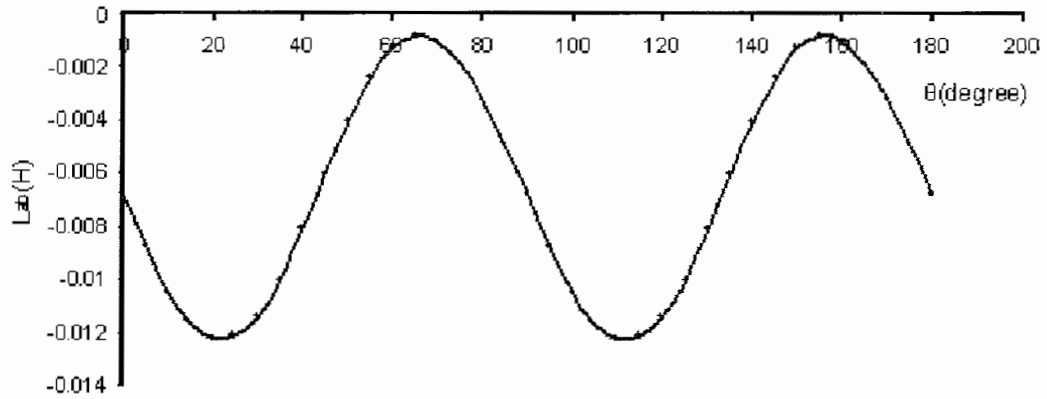
شکل ۴) اندوکتانس متقابل بین سیم پیچی تحریک 'a' سیم پیچی فاز 'a'

$$L_{fa} = (0.200753095) \cos(2\theta + 1.83259581) + (2.45237 \times 10^{-8}) \cos(6\theta + 0.204237984) + (0.000697599) \cos(10\theta + 2.879827959) + (0.000249698) \cos(14\theta - 2.8798369)$$



شکل ۵) اندوکتانس خودی سیم پیچی فاز 'a'

$$L_{aa} = (1.31137837 \times 10^{-2}) + (0.005095737) \cos(4\theta - 2.61799383) + (1.21262422 \times 10^{-4}) \cos(8\theta + 1.047204472) + (3.53962868 \times 10^{-5}) \cos(12\theta - 1.57077744) + (1.19904604 \times 10^{-5}) \cos(16\theta + 2.09447430) + (5.84624347 \times 10^{-6}) \cos(20\theta + 2.61788131) + (3.57955425 \times 10^{-6}) \cos(24\theta - 3.14145820) + (8.38259564 \times 10^{-6}) \cos(28\theta + 0.523629389)$$



شکل ۶) اندوکتانس متقابل بین سیم پیچی فاز 'a' و سیم پیچی فاز 'b'

$$L_{ab} = (-6.51601136 \times 10^{-3}) + (0.005770421) \cos(4\theta + 1.63704569) +$$

$$(1.11941105 \times 10^{-4}) \cos(8\theta - 1.095897511) +$$

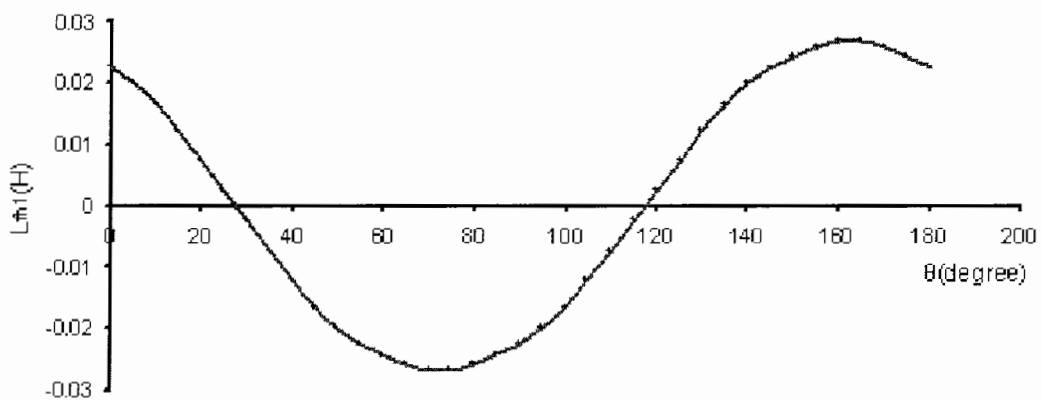
$$(3.12355783 \times 10^{-5}) \cos(12\theta + 0.602627888) +$$

$$(3.29090539 \times 10^{-5}) \cos(16\theta + 0.339920335) +$$

$$(1.54135268 \times 10^{-5}) \cos(20\theta - 1.90334556) +$$

$$(4.78508636 \times 10^{-6}) \cos(24\theta + 1.186959968) +$$

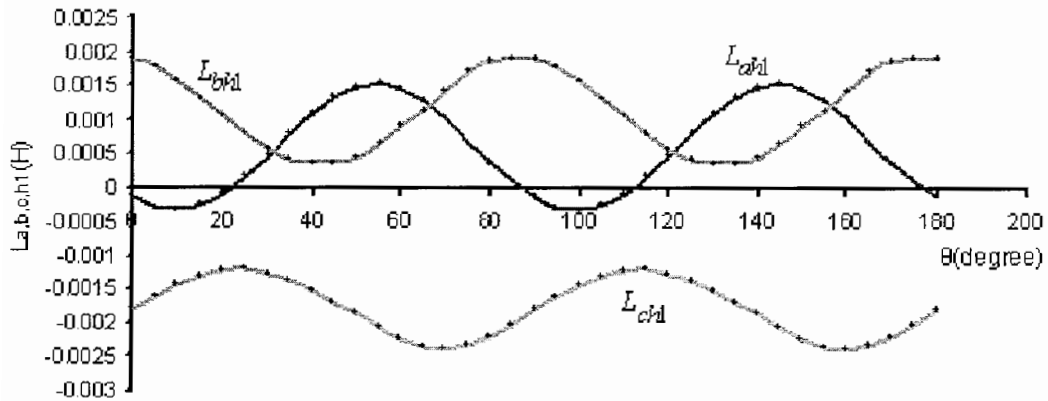
$$(2.38942623 \times 10^{-5}) \cos(28\theta - 1.22370229)$$



شکل ۷) اندوکتانس متقابل بین سیم پیچی تحریک 'f' و سیم پیچی کمکی 'hl'

$$L_{hl} = (0.027516105) \cos(2\theta + 0.610865288) + (0.000703763) \cos(6\theta - 1.308997403) +$$

$$(7.7757 \times 10^{-5}) \cos(10\theta + 3.054327795) + (0.000151614) \cos(14\theta - 2.007136423)$$

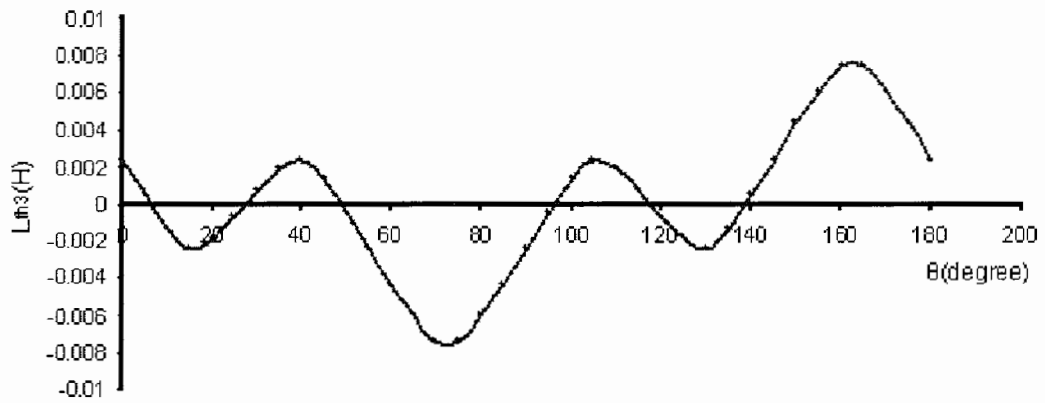


شکل ۸) اندوکتانسهای متقابل بین سیم پیچی های فاز 'a'، 'b' و 'c' و سیم پیچی کمکی 'h1'

$$\begin{aligned}
 L_{ah1} = & (5.95450249 \times 10^{-4}) + (0.000919929) \cos(4\theta + 2.50007771) + \\
 & (1.33320033 \times 10^{-5}) \cos(8\theta - 0.796171489) + \\
 & (7.64149042 \times 10^{-6}) \cos(12\theta + 0.100895688) + \\
 & (1.32422012 \times 10^{-5}) \cos(16\theta + 0.727583654) + \\
 & (1.11202859 \times 10^{-5}) \cos(20\theta + 1.57155097) + \\
 & (4.41617699 \times 10^{-6}) \cos(24\theta + 2.20986965) + \\
 & (4.76462828 \times 10^{-6}) \cos(28\theta - 1.41184446)
 \end{aligned}$$

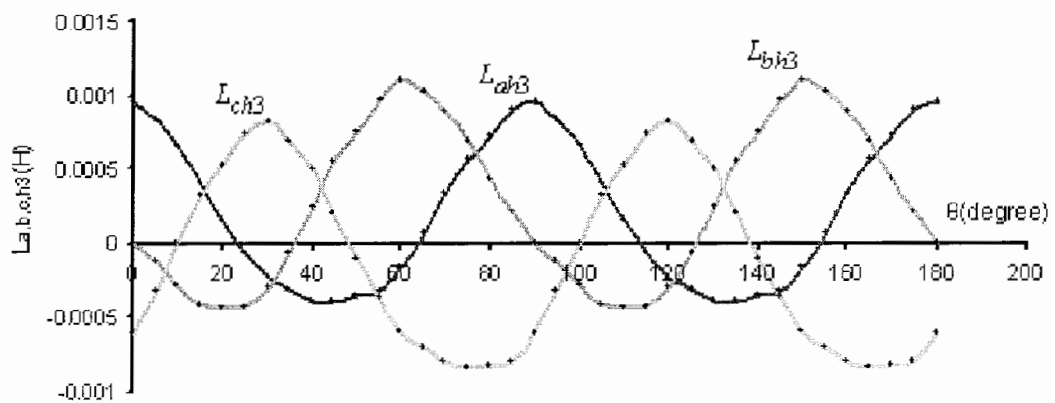
$$\begin{aligned}
 L_{bh1} = & (1.11389623 \times 10^{-3}) + (0.000790446) \cos(4\theta + 0.250518501) + \\
 & (2.15968782 \times 10^{-5}) \cos(8\theta + 1.054780466) + \\
 & (2.14244443 \times 10^{-6}) \cos(12\theta + 1.90115257) + \\
 & (4.00527170 \times 10^{-6}) \cos(16\theta - 2.84140831) + \\
 & (1.10496320 \times 10^{-5}) \cos(20\theta - 1.69259329) + \\
 & (3.14085123 \times 10^{-6}) \cos(24\theta + 0.190852295) + \\
 & (2.57969244 \times 10^{-6}) \cos(28\theta - 1.22755382)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{ch1} = & (-1.77115115 \times 10^{-3}) + (0.000568224) \cos(4\theta - 1.68894332) + \\
 & (3.00112552 \times 10^{-5}) \cos(8\theta - 0.544166181) + \\
 & (7.22317872 \times 10^{-6}) \cos(12\theta + 1.5229306) + \\
 & (4.30454874 \times 10^{-6}) \cos(16\theta - 1.46444948) + \\
 & (5.13704343 \times 10^{-6}) \cos(20\theta - 2.07765063) + \\
 & (2.10711464 \times 10^{-6}) \cos(24\theta - 2.77937266) + \\
 & (3.33562131 \times 10^{-6}) \cos(28\theta + 1.80856529)
 \end{aligned}$$



شکل ۹) اندوکتانس متقابل بین سیم پیچی تحریک 'f' و سیم پیچی کمکی 'h3'

$$L_{mh3} = (0.003813578) \cos(2\theta + 0.610865273) + (0.003694751) \cos(6\theta + 1.832595012) + (0.000257271) \cos(10\theta - 0.087263517) + (0.000139486) \cos(14\theta - 2.007134487)$$



شکل ۱۰) اندوکتانسهای متقابل بین سیم پیچی های فاز 'a', 'b' و 'c' و سیم پیچی کمکی 'h3'

$$\begin{aligned}
L_{ah3} = & (1.84590982 \times 10^{-4}) + (0.000670369) \cos(4\theta + 0.096398198) + \\
& (8.34199785 \times 10^{-5}) \cos(8\theta + 0.270676746) + \\
& (1.84263069 \times 10^{-5}) \cos(12\theta - 1.86489392) + \\
& (1.55139282 \times 10^{-5}) \cos(16\theta - 0.521820458) + \\
& (1.42034921 \times 10^{-5}) \cos(20\theta + 0.91627052) + \\
& (4.11850684 \times 10^{-6}) \cos(24\theta + 1.144977293) + \\
& (1.22982336 \times 10^{-5}) \cos(28\theta + 1.09819734)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_{bh3} = & (2.64358475 \times 10^{-4}) + (0.00074899) \cos(4\theta + 1.92157921) + \\
& (8.18965868 \times 10^{-5}) \cos(8\theta - 1.51685134) + \\
& (1.82806060 \times 10^{-5}) \cos(12\theta - 1.94873460) + \\
& (9.27840875 \times 10^{-6}) \cos(16\theta + 1.215076352) + \\
& (1.72173876 \times 10^{-5}) \cos(20\theta - 1.86903866) + \\
& (5.81094139 \times 10^{-6}) \cos(24\theta + 0.428597743) + \\
& (1.40792104 \times 10^{-5}) \cos(28\theta + 3.03544983)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_{ch3} = & (-1.24475973 \times 10^{-4}) + (0.000826683) \cos(4\theta - 2.06898243) + \\
& (9.93787432 \times 10^{-5}) \cos(8\theta + 2.48214891) + \\
& (1.98884938 \times 10^{-5}) \cos(12\theta - 2.01791835) + \\
& (1.27405362 \times 10^{-5}) \cos(16\theta - 2.39366062) + \\
& (7.21901506 \times 10^{-6}) \cos(20\theta + 2.64338579) + \\
& (1.31749341 \times 10^{-6}) \cos(24\theta + 0.712474038) + \\
& (1.56284346 \times 10^{-5}) \cos(28\theta - 0.990565877)
\end{aligned}$$

لازم به ذکر است که پارامترهای محاسبه شده می توانند با استفاده از چند تست ساده، مشابه پروسه فوق روی ماشین واقعی مورد ارزیابی قرار گیرند [۴]. در این تست ها سیم پیچی ها با ولتاژ سینوسی دارای فرکانس بسیار کم تغذیه شده و ولتاژ القایی در دیگر سیم پیچی ها اندازه گیری می شوند. به علت تلفات آهن نتایج این آزمایشات در فرکانس زیاد دقیق نخواهند بود و اندازه گیری ها در آزمایش با فرکانس های کم نیز می تواند مشکلاتی را داشته باشد.

۳-۳ شبیه سازی سیستم در محیط MATLAB

معادلات آلترا تورتور وصل به یک بار سه فاز و اتصال ستاره که می تواند نامتعادل باشد در دستگاه abc به صورت معادله (۷-۳) را در نظر بگیرید.

$$\frac{d[i_{fabc}]}{dt} = ([L_{fabc}(\theta)] + [L_l] + [L_{le}])^{-1} \{ [v_{fabc}] - ([r_{fabc}] + [R_l]) [i_{fabc}] - \omega \frac{d[L_{fabc}(\theta)]}{d\theta} [i_{fabc}] - R_o [U_l] [i_{fabc}] \} \quad (۷-۳)$$

بطوریکه:

$$[L_{le}] = \begin{bmatrix} l_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_s \end{bmatrix} \quad [i_{fabc}] = \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad [v_{fabc}] = \begin{bmatrix} v_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[L_{fabc}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{ff}(\theta) & L_{fa}(\theta) & L_{fb}(\theta) & L_{fc}(\theta) \\ L_{af}(\theta) & L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{bf}(\theta) & L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{cf}(\theta) & L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[R_l] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad [r_{fabc}] = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

$$[U_l] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad [L_l] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_c \end{bmatrix}$$

(۸-۳)

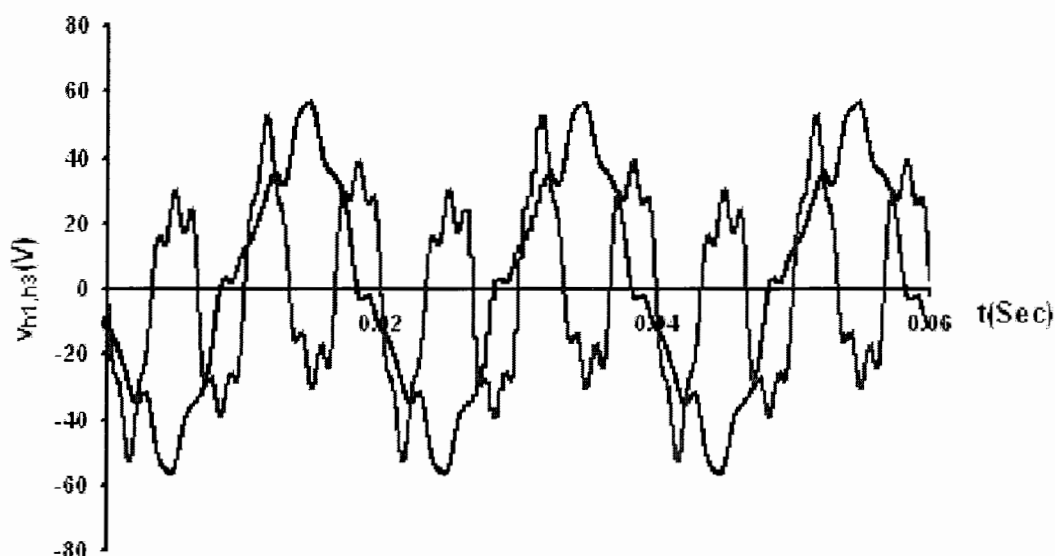
برای عمومیت و امکان تحلیل دو حالت، یکی وقتی نقطه صفر بار به نقطه صفر ژنراتور وصل است و دوم حالتی که این نقاط به یکدیگر متصل نیستند، یک مقاومت دلخواه (R_o) بین دو نقطه فوق منظور شده است که مقدار آن برای حالت دوم به اندازه کافی بزرگ انتخاب می شود.

در معادله (۷-۳) v_f ولتاژ تحریک و بردار $[i_{fab}]$ بردار جریان سیم پیچی های تحریک و فازهای a, b, c است. بار ژنراتور با مقادیر مقاومت ها و اندوکتانس های قرار گرفته در هر فاز مدل می شود که با ماتریس های R_l و L_l بترتیب معرفی شده است. r_f مقاومت و l_f مجموع اندوکتانس پراکندگی سیم پیچ تحریک اصلی و اندوکتانس ماشین اکسایتر و یا بطور خلاصه پارامترهای سیستم تحریک ژنراتور می باشند. مقدار این پارامترها برای ژنراتور مورد بررسی 3.7 اهم و 1.0 هانری به ترتیب در نظر گرفته می شود. همچنین مقاومت سیم پیچی و اندوکتانس پراکندگی هر فاز بترتیب با r_s و l_s نشان داده شده است که مقدار آنها برای ژنراتور تحت شبیه سازی 0.199 اهم و 0.002 هانری می باشد. در معادله (۷-۳)، ω سرعت زاویه ای روتور می باشد که در همه شبیه سازیهای ارایه شده در این گزارش مقدار آن ثابت فرض شده است.

لازم به ذکر است به علت ناچیز بودن تعداد دور و جریان سیم پیچی های کمکی $h1$ و $h3$ و در نتیجه آمپر دور آنها در مقایسه با سیم پیچ تحریک و فازهای ماشین، در معادله فوق برای سادگی از جریان این سیم پیچی ها چشم پوشی شده است هر چند این امکان وجود دارد که جریان این کویل ها نیز در معادله لحاظ شود. در نظر گرفتن این کویل ها ضمن اینکه احتیاج به قرار دادن مدل AVR و حتی ماشین اکسایتر در مدل کلی سیستم دارد و باعث پیچیدگی سیستم می شود [۴]، از طرف دیگر همانطور که گفته شد این ملاحظات روی نتیجه محاسبات اثر زیادی نخواهد داشت.

برای شبیه سازی سیستم در محیط MATLAB ابتدا معادلات دیفرانسیل (۷-۳) به صورت گسسته نوشته می شوند. در این معادلات v_f و پارامترهای بار به عنوان ورودی های سیستم مشخص شده و سپس با اعمال مقادیر اولیه جریان ها و همچنین با انتخاب نمو زمانی مناسب خروجی های گذرای سیستم از قبیل جریان تحریک و ولتاژها و جریان های فاز برای محدوده زمانی تعیین شده محاسبه می شوند. اگر شبیه سازی برای یک بازه زمانی به اندازه کافی بزرگ انجام گیرد می توان به ازای هر شرایط اولیه دلخواه پاسخ های حالت دایمی را نیز پس از شرایط گذرا مشاهده نمود. در هر لحظه پس از محاسبه جریان تحریک و جریان های فاز، ولتاژ مدار باز سیم پیچ های $h1$ و $h3$ از فرم گسسته معادلات ۳-۹ بدست می آیند.

سیستم تغذیه AVR در این طرح پژوهشی، با مقایسه شکل موج ولتاژ سیم پیچی ها در شرایط عملکرد مختلف ژنراتور مورد تحقیق قرار گرفته است که بعضی از نتایج در زیر ارائه و بحث می شوند.

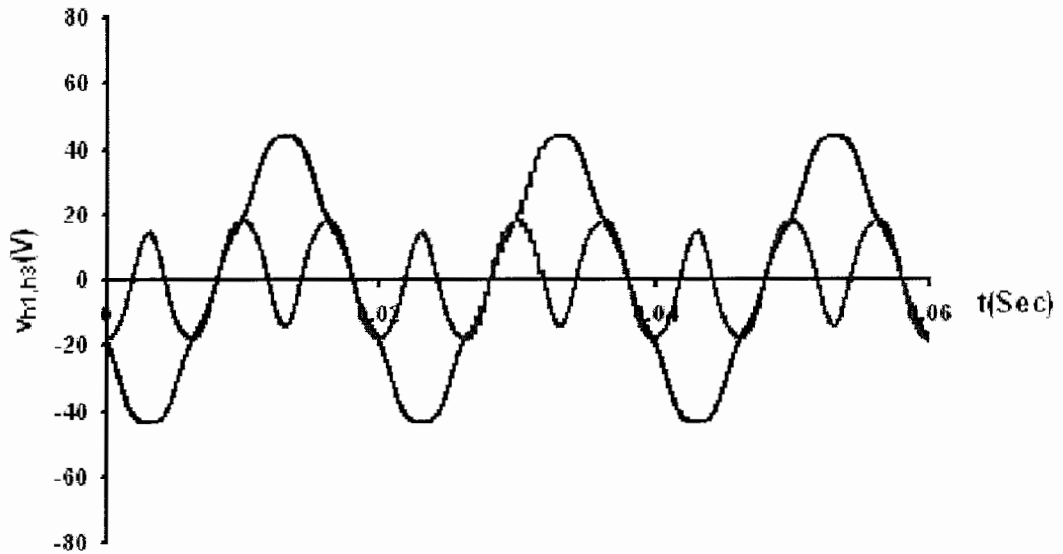


شکل ۱۱) ولتاژ سیم پیچی $h1$ (---) و ولتاژ سیم پیچی $h3$ (—) تغذیه AVR در بار کامل و ضریب توان 0.8

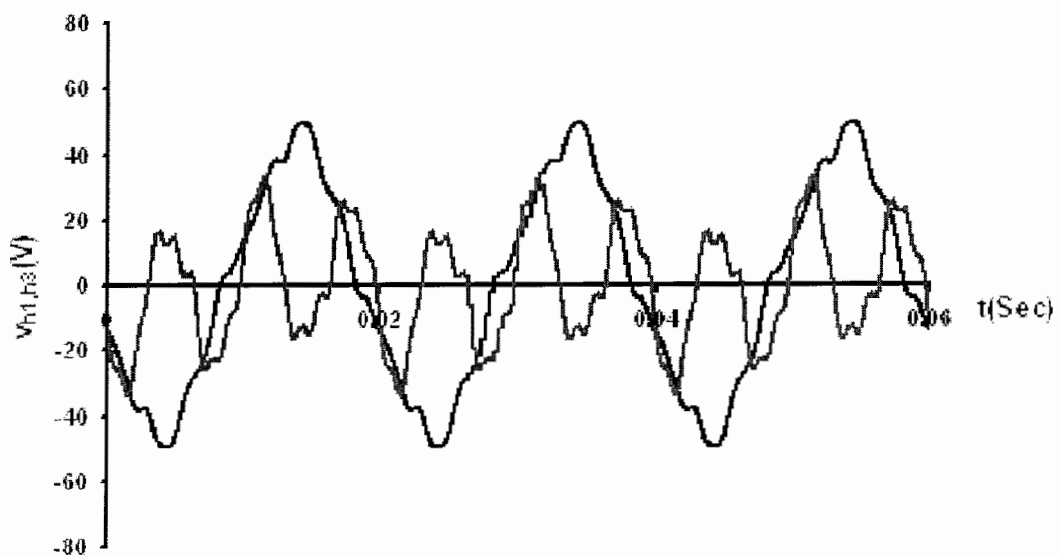
نتایج شبیه سازی برای حالت‌های بی باری، نصف بار کامل و بار کامل و ضریب توان 0.8 در شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۱ به ترتیب نشان داده شده اند. همانطور که در شکل ۱۲ دیده می شود در حالت بی باری نقش سیم پیچ $h3$ در تغذیه AVR ناچیز می باشد. در این شرایط تقریباً فقط ولتاژ سیم پیچ $h1$ بعد از یکسو و فیلتر شدن مستقیماً بصورت دامنه شکل موج PWM در خروجی AVR ظاهر می شود. این ولتاژ فیلتر شده برای تحریک میدان اکسایتر و بنابراین ایجاد ولتاژ نامی در ترمینال ژنراتور کفایت می کند.

در حالت نصف بار کامل (شکل ۱۳) ضمن اینکه دامنه ولتاژ سیم پیچ $h1$ بیشتر از دامنه ولتاژ آن در حالت بی باری (شکل ۱۲) است نقش سیم پیچ $h3$ نیز در تغذیه AVR در مقایسه با حالت بی باری قابل توجه است. همانطور که در شکل ۱۱ مشهود است این افزایش دامنه ولتاژ سیم پیچ $h1$ و $h3$ و همچنین حضور بیشتر سیم پیچ $h3$ در تغذیه AVR در حالت بار کامل به مراتب بیشتر از حالت‌های بی باری و نصف بار کامل شکل‌های ۱۲ و ۱۳ است. چون تحریک لازم در حالت بار کامل

بیشتر از تحریک مورد نیاز در حالت نصف بار کامل و تحریک در حالت اخیر بیشتر از تحریک لازم برای حالت بی باری می باشد این عملکرد کویل های تغذیه کاملا هماهنگ و سازگار با مکانیزم کنترل ولتاژ است.



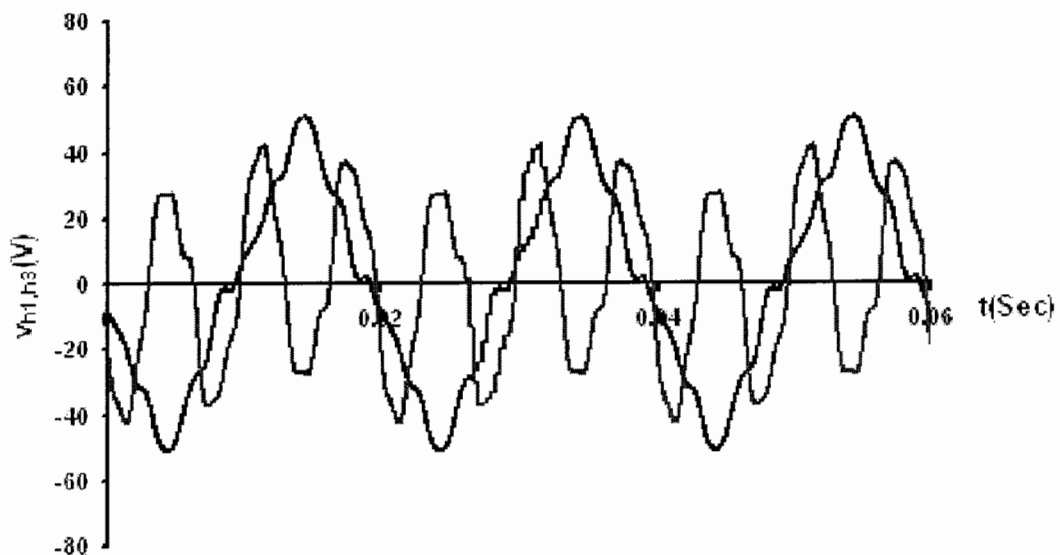
شکل ۱۲) ولتاژ سیم پیچی $h1$ (—) و ولتاژ سیم پیچی $h3$ (---) تغذیه AVR در بی باری



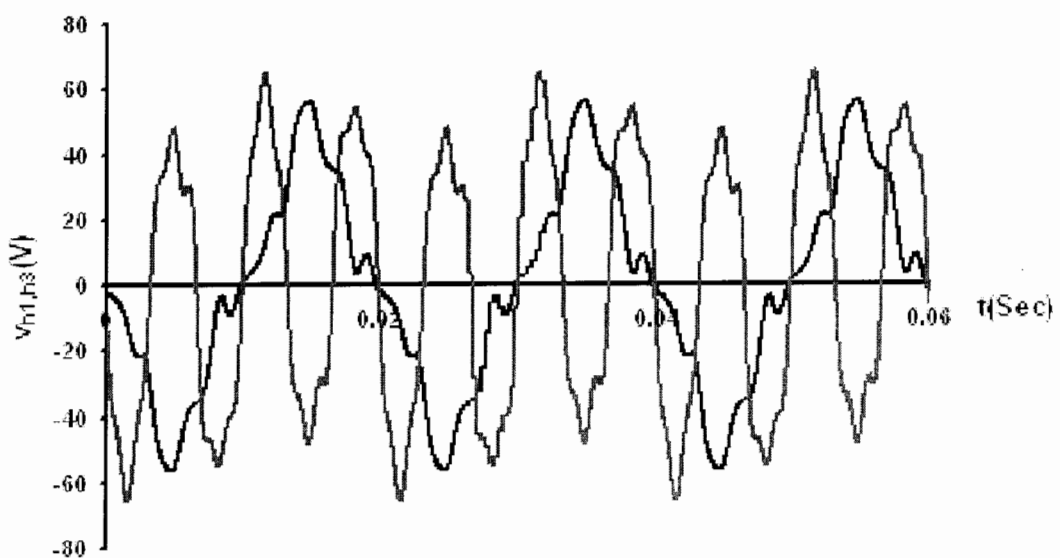
شکل ۱۳) ولتاژ سیم پیچی $h1$ (—) و ولتاژ سیم پیچی $h3$ (---) تغذیه AVR در نصف بار کامل و ضریب توان 0.8

۲-۴ نتایج شبیه سازی برای بار کامل و ضریب توان ۱

عملکرد مناسب سیستم تغذیه برای شرایط عملکرد متفاوت مورد بررسی و تایید قرار گرفته است. یک نمونه دیگر از این نتایج برای نصف بار کامل و بار کامل اما با ضریب توان ۱ در شکل های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نمایش داده شده است. با مقایسه شکل های ۱۲، ۱۴ و ۱۵ همه تحلیل های ذکر شده در بخش قبل را می توان برای این حالت نیز تکرار کرد.



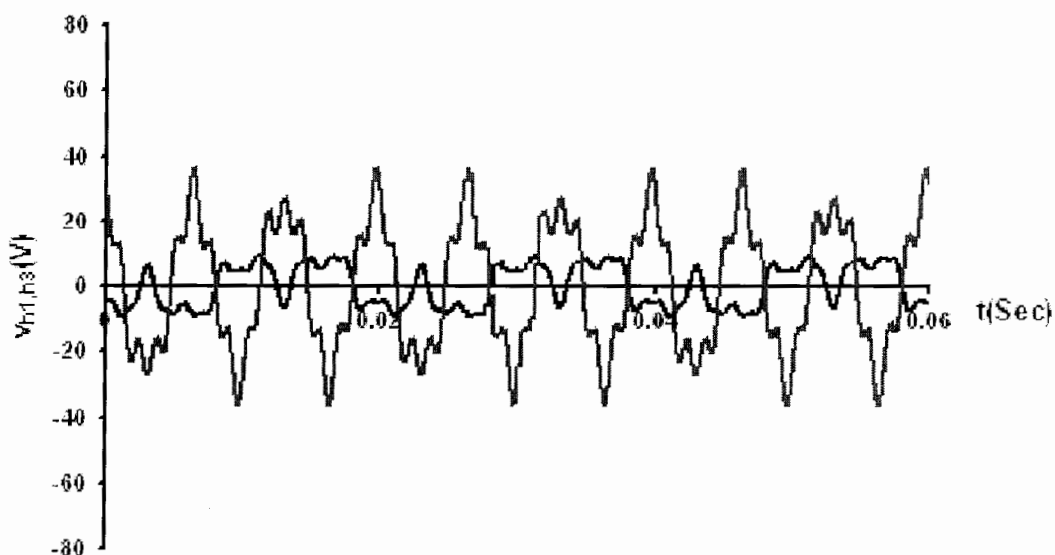
شکل ۱۴) ولتاژ سیم پیچی $h1$ (—) و ولتاژ سیم پیچی $h3$ (---) تغذیه AVR در نصف بار کامل و ضریب توان 1.0



شکل ۱۵) ولتاژ سیم پیچی $h1$ (—) و ولتاژ سیم پیچی $h3$ (---) تغذیه AVR در بار کامل و ضریب توان 1.0

۳-۴ نتایج شبیه سازی برای اتصال کوتاه سه فاز

عملکرد جالب دیگر کویل های تغذیه AVR، شکل موج های ولتاژ آنها در شرایط اتصال کوتاه می باشد. این ولتاژها هنگامی که جریان نامی در ترمینال های ژنراتور اتصال کوتاه شده (حالت قبل از عمل کردن فیوز اضافه جریان) جاری است در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بدیهی است که در این حالت AVR تلاش خواهد کرد که با فراهم نمودن بیشترین خروجی با بیشترین مقدار Duty cycle یعنی برابر ۱، ولتاژ ترمینال ژنراتور را افزایش دهد، ولی به علت اتصال کوتاه شدن ژنراتور هرگز چنین اتفاقی نمی افتد. از طرف دیگر همانطور که در شکل ۱۶ دیده می شود در این حالت ولتاژهای نه چندان افزایش یافته ای بلکه حتی نسبتاً کمتری در مقایسه با حالت های قبل در ورودی AVR ظاهر می شود و این خود باعث خروجی مناسب AVR و محفوظ ماندن ماشین اکسایتر و دیگر المان های سیستم قبل از رفع خطای اتصال کوتاه می شود.



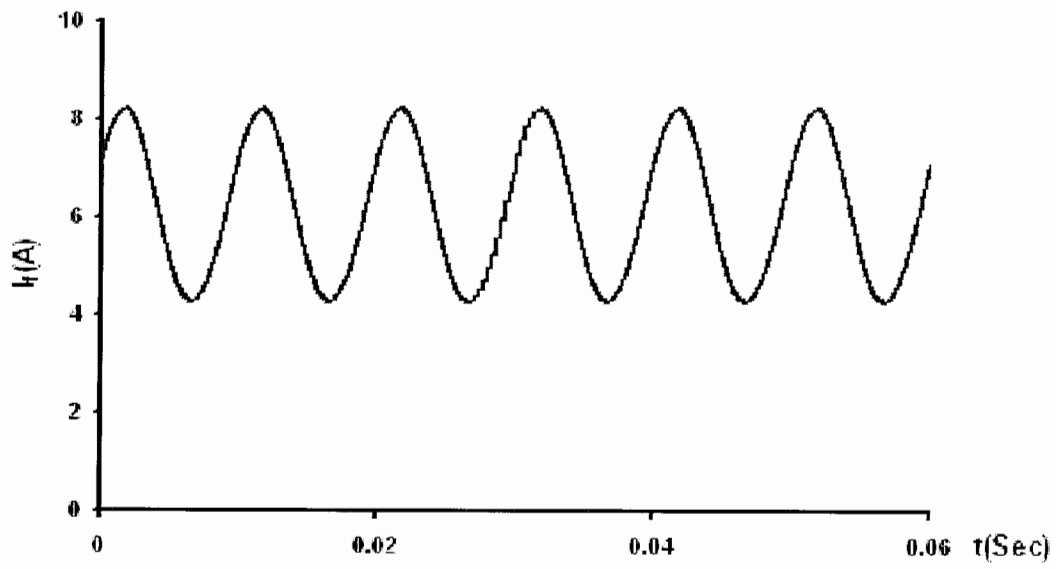
شکل ۱۶) ولتاژ سیم پیچی h1 (—) و ولتاژ سیم پیچی h3 (---) تغذیه AVR در شرایط اتصال کوتاه و جریان نامی

۴-۴ نتایج شبیه سازی برای بار نامتعادل دو فاز

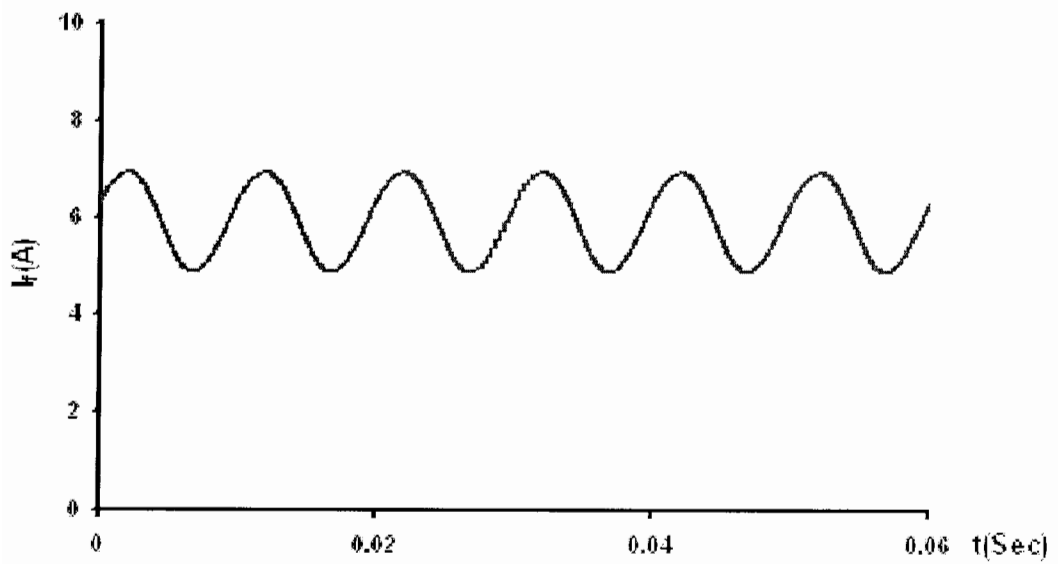
عملکرد متعادل و نامتعادل ژنراتور بسیار متنوع می باشد لذا مقایسه عملکرد ژنراتور و کوپل های تغذیه AVR در شرایط متفاوت بخصوص در سطوح تحریک و ولتاژ مختلف بسیار مشکل می باشد. به ویژه در شرایط بار نامتعادل می بایست توجه نمود که ولتاژهای فاز و خط نامتعادل بوده و ولتاژ منحصر به فردی برای مقایسه وجود ندارد. به هر حال همه شبیه سازیهای انجام گرفته در این پروژه این موضوع را بدون استثناء تایید می کند که هنگامی که ژنراتور در شرایط عملکرد خاصی به سطح ولتاژ تحریک بیشتری نیاز دارد سیم پیچهای تغذیه AVR در هماهنگی با کنترلر Duty cycle دامنه ولتاژ افزایش یافته ای را فراهم می کند. این نقش اضافی کوپلها، تثبیت ولتاژ را هنگام تغییرات بار تسریع می نماید. همانطور که قبلا متذکر شدیم کنترل ولتاژ اساسا توسط کنترلر و با تنظیم نسبت Mark/Space انجام می گیرد ولی سطح ولتاژ کوپل های مورد بررسی می بایست کافی برای تحریک ماشین اکسایتر و نهایتا تحریک ژنراتور باشد. در این قسمت در شکلهای ۱۷ تا ۲۴ نمونه هایی از نتایج شبیه سازی انجام گرفته برای یک بار نامتعادل اما در دو شرایط مختلف یکی با اتصال نقاط ستاره بار و ژنراتور و دیگری بدون این اتصال نمایش داده می شود که عملکرد ژنراتور و کوپل های مورد نظر را در این دو حالت متمایز برای مقایسه نشان می دهد. بار نامتعادل بکار رفته در این شبیه سازی همان پارامترهای بار کامل با ضریب توان 0.8 پس فاز می باشد با این تفاوت که یکی از فازها قطع است. ولتاژ تحریک ژنراتور در هر دو حالت ثابت نگاه داشته شده است. همانطور که از مقایسه شکل موج جریان تحریک در حالت عملکرد نامتعادل ژنراتور بدون اتصال سیم صفر شکل ۱۷، با شکل موج جریان تحریک در حالت عملکرد مشابه اما با وجود اتصال سیم صفر شکل ۱۸ مشاهده می شود، نوسانات جریان تحریک و حتی اندکی سطح dc در شرایط عملکرد با سیم صفر کمتر از حالت عملکرد بدون سیم صفر است. فرکانس نوسانات جریان تحریک در هر دو حالت ۱۰۰ هرتز می باشد که به علت وجود میدان چپ گرد ۵۰ هرتز در حالت کار نامتعادل می باشد. تفاوت در میزان نوسانات جریان های تحریک دو شرایط کار به علت اختلاف در میزان میدان چپ گرد حاصل از اختلاف در جریان های فاز نشان داده شده در شکل های ۱۹ و ۲۰

به ترتیب برای حالت کار بدون و با اتصال سیم صفر می باشد. تاثیر سیم صفر روی شکل موج ولتاژهای فاز نیز در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نمایان می باشد. تاثیر جریان سیم صفر روی ولتاژ سیم پیچ های کمکی تغذیه AVR مهم و قابل بررسی است. مقایسه شکل موجهای ولتاژ سیم پیچ های کمکی در این دو شرایط کار نشان داده شده در شکل های ۲۳ و ۲۴ نشان می دهد که وجود سیم صفر (شکل ۲۴) سهم ولتاژ v_{h3} را نسبت به v_{h1} در مقایسه با حالت عملکرد بدون اتصال این سیم (شکل ۲۳) افزایش می دهد. دامنه کم این ولتاژها در حالت عملکرد نامتعادل، به دلیل جریان کم سیم پیچی تحریک اصلی در شبیه سازی می باشد و اگر جریان تحریک افزایش یابد دامنه این ولتاژها نیز افزایش خواهد یافت.

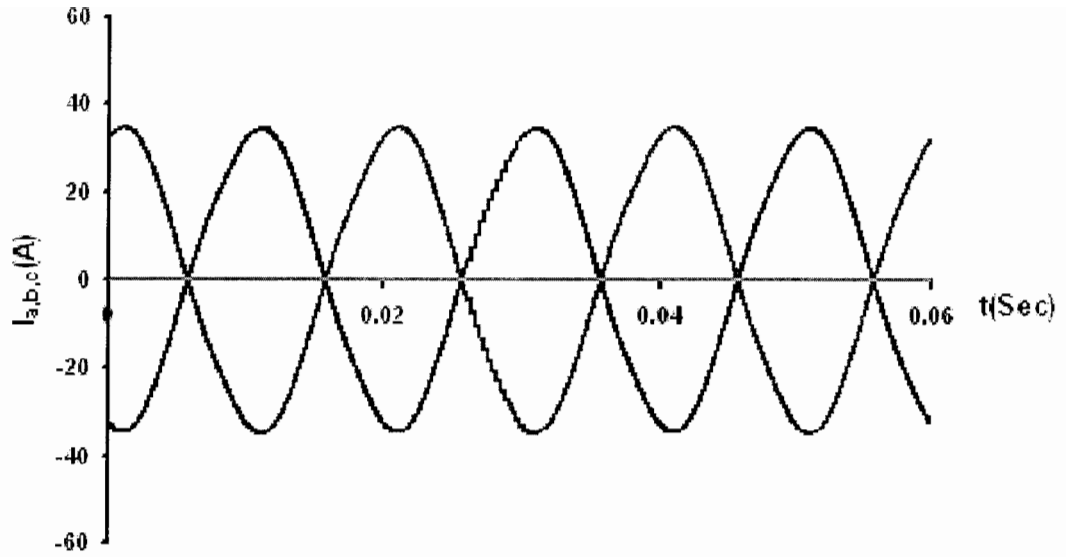
در تمامی شبیه سازی های انجام گرفته و نمایش یافته در بالا و در زیر، جریان های سیم پیچ های کمکی چشم پوشی شده است. این جریان ها بدون شک هارمونیک های ولتاژ فاز و خط را تا حدودی دمپ می نمایند و حتی به تعادل ولتاژها در حالت کار نامتعادل کمک خواهند نمود. این نتیجه گیری بر اساس یافته های نقش دمپ‌های روتور در بهبود THD ولتاژ ژنراتور در شرایط عملکرد متفاوت می باشد [۷].



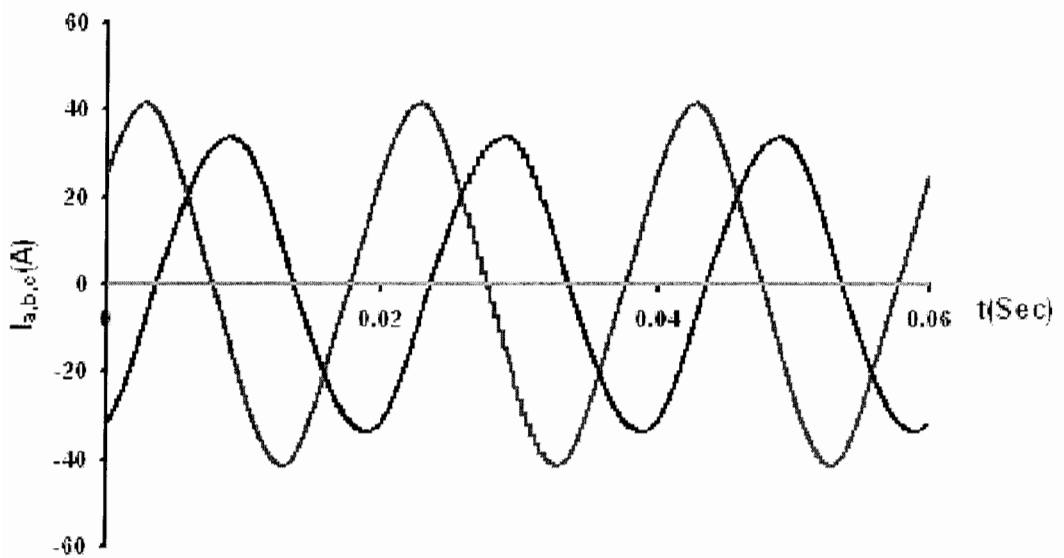
شکل ۱۷) جریان تحریک اصلی در شرایط بار نامتعادل دو فاز بدون سیم صفر



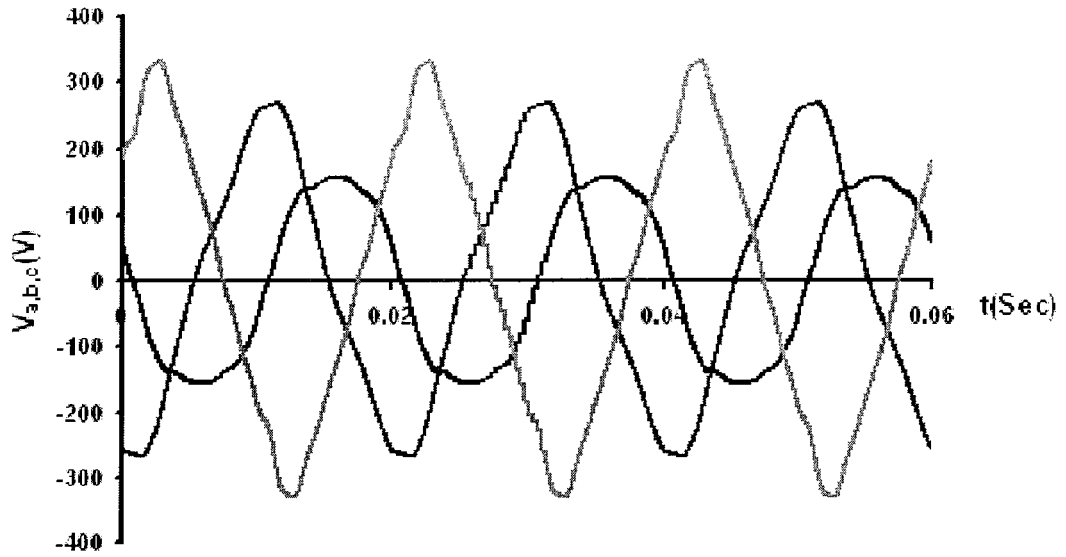
شکل ۱۸) جریان تحریک اصلی در شرایط بار نامتعادل دو فاز با سیم صفر



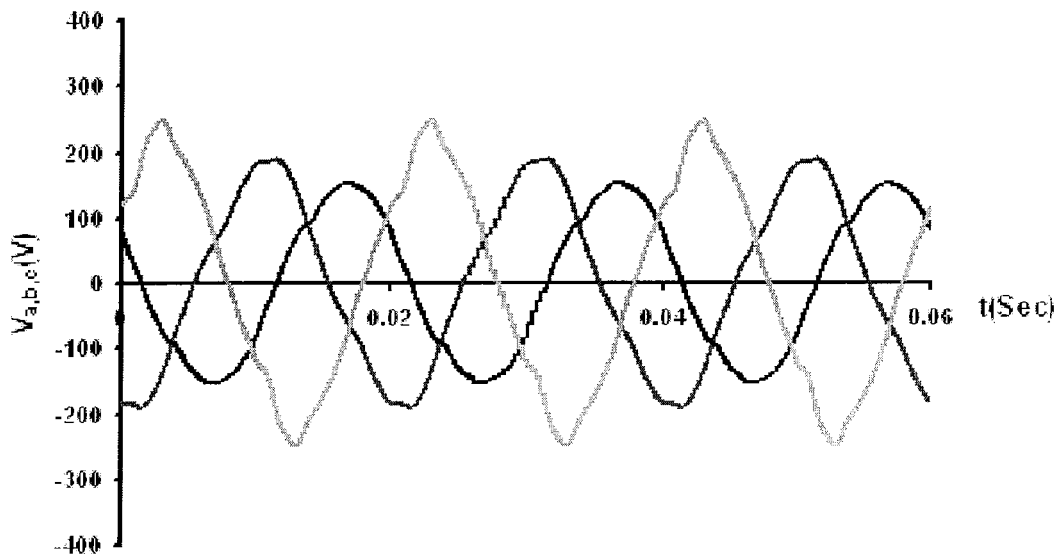
شکل ۱۹) جریان فازهای a ، b ، و c در شرایط بار نامتعادل دو فاز بدون سیم صفر



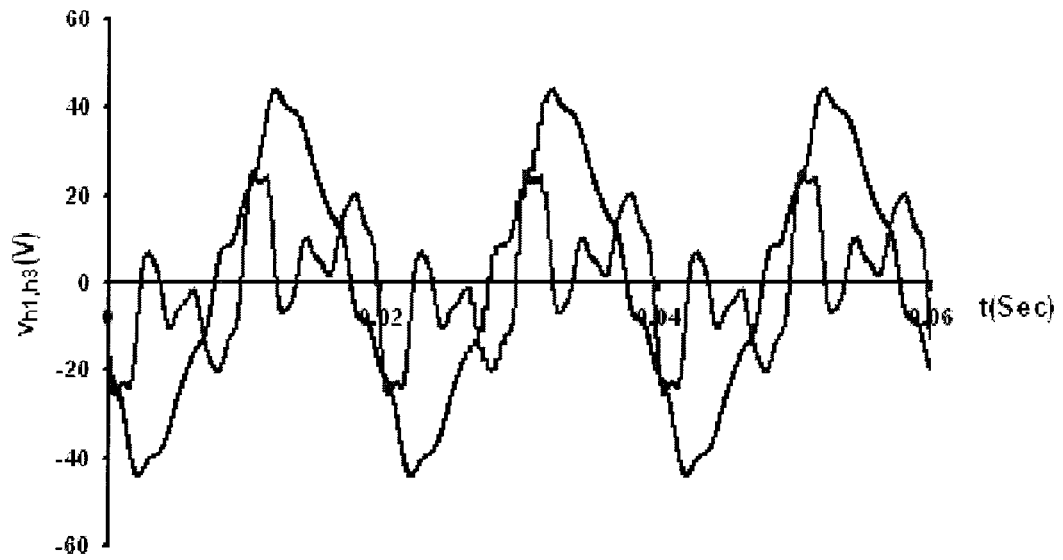
شکل ۲۰) جریان فازهای a ، b ، و c در شرایط بار نامتعادل دو فاز با سیم صفر



شکل (۲۱) ولتاژ فازهای a ، b ، و c در شرایط بار نامتعادل دو فاز بدون سیم صفر

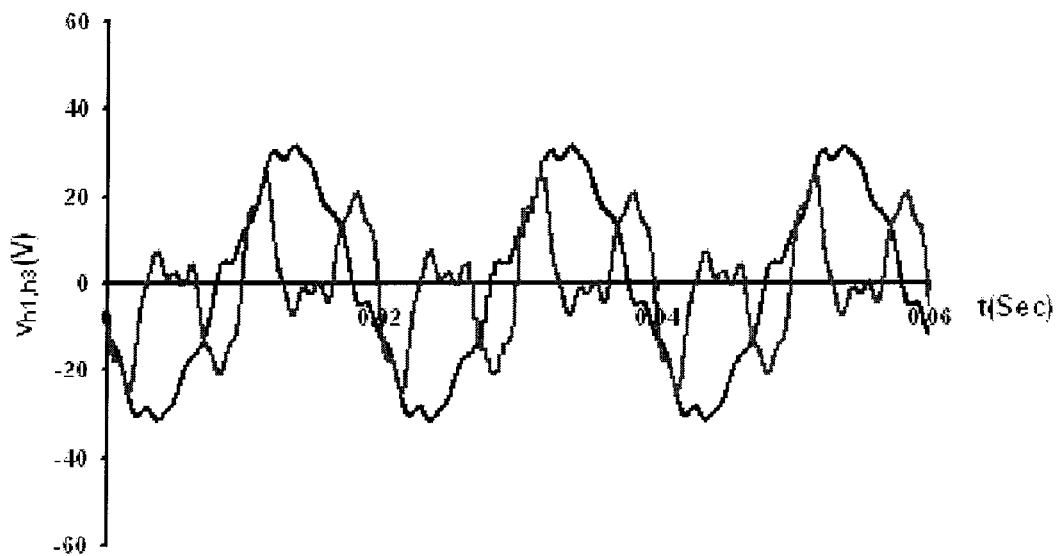


شکل (۲۲) ولتاژ فازهای a ، b ، و c در شرایط بار نامتعادل دو فاز با سیم صفر



شکل ۲۳) ولتاژ سیم پیچی $h1$ (—) و ولتاژ سیم پیچی $h3$ (---) تغذیه AVR در شرایط بار نامتعادل دو فاز بدون

سیم صفر



شکل ۲۴) ولتاژ سیم پیچی $h1$ (—) و ولتاژ سیم پیچی $h3$ (---) تغذیه AVR در شرایط بار نامتعادل دو فاز با سیم

صفر

۴-۵ نتایج

با استفاده از روش اجزاء محدود (FE)، طرح دو سیم پیچ کمکی تغذیه تنظیم کننده ولتاژ خودکار (AVR) یک ژنراتور سنکرون بدون جاروبک مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. یکی از این سیم پیچی ها هارمونیک های اول و هفتم شار را بکار می گیرد و دیگری هارمونیک های سوم و پنجم را مورد استفاده قرار می دهد. بطور کلی این سیم پیچی ها می توانند هارمونیک را همانند دمپر بارها البته در طرف استاتور دمپ کنند.

با یک شبیه سازی در حوزه زمان و در دستگاه *abc*، عملکرد کوپل های کمکی در حالت بارهای متعادل و غیر متعادل نرمال مورد تحلیل قرار گرفت و مشاهده شد که ولتاژ کافی برای تغذیه AVR فراهم می شود. همچنین سازگار بودن تغییرات ولتاژ این سیم پیچی ها با مکانیزم کنترل ولتاژ از جمله یافته های جالب این تحقیق بود که برای چند نمونه از شرایط کار ژنراتور نمایش داده شد. شبیه سازی سیستم در حالت های مختلف بار متعادل و غیر متعادل نشان داد که این کوپل ها ضمن فراهم کردن ولتاژ کافی برای تغذیه AVR، هنگامی که ژنراتور در شرایط عملکرد خاصی به سطح ولتاژ تحریک بیشتری نیاز دارد در هماهنگی با کنترلر، دامنه ولتاژ افزایش یافته ای را فراهم می کنند. این نقش اضافی کوپل ها، تثبیت ولتاژ را هنگام تغییرات بار تسریع می نماید نتایج بدست آمده قابلیت و کفایت طرح را در هر شرایط کار دیگر نشان داده است که فقط نمونه هایی از نتایج به نمایش در آمد.

شبیه سازی انجام گرفته در محیط MATLAB قادر به محاسبه ولتاژ مدار باز کوپل های کمکی در رژیم گذرایی می باشد ولی در این گزارش برنامه برای زمان های نسبتاً طولانی اجرا شده و فقط نتایج حالت دائمی بدلیل اهمیت آن در این پروژه ارائه شده است.

بررسی عملکرد گذرایی کوپل های کمکی تغذیه AVR در یک شبیه سازی کامل سیستم در بر گیرنده مدل های سیستم AVR، ماشین اکسایتر، ژنراتور اصلی، گاورنر و بار به عنوان پیشنهاد برای کار بعدی مطرح می شود.

منابع و مراجع

- [١] L L J Mahon, "Diesel Generator Handbook", Butterworth-Heineman Ltd, 1992.
- [٢] Ahmad Darabi, Colin Tindall, Stuart Ferguson, "Finite-Element Time-Step Coupled Generator, Load, AVR and Brushless Exciter Modelling", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 2 , pp. 258- 264, June 2004.
- [٣] Ahmad Darabi, Colin Tindall, "Analogue AVR model for use in real time transient simulation of small salient pole alternators", IEE, PEMD conference, Bath Section 6c, Paper ID: 24, April 2002.
- [٤] Ahmad Darabi, Colin Tindall, "Brushless Exciter Modelling for Small Salient Pole Alternators using Finite Elements", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, pp. 306-312, September 2002.
- [٥] British Standard, "Specification for Voltage Regulation and Parallel Operation of A.C. Synchronous Generators", BS4999: Part 140:1987.
- [٦] J. Matsuki, T. Katagi, T. Okada, "Slot ripples in the damper windings of a salient-pole synchronous generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, March 1994.
- [٧] Ahmad Darabi, Colin Tindall, "Damper Cages in Genset Alternators; FE Simulation and Measurement", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, pp. 73-80, March 2004.
- [8] Peter P. Silvester and Ronald L. Ferrari, "Finite elements for electrical engineers", Third Edition, Cambridge University Press, 1996.
- [٩] "SLIM Electromagnetic Engineering Software", UNIX version 3, Alstom Research & Technology Centre P.O. Box 30, Lichfield Road Stafford ST17 4LN England.
- [١٠] Ivanyi, A., "Hysteresis models in electromagnetic computation", Budapest, Akademiai Kiado, 229p, 1997.