

راه انداز جدید برای موتور رلوکتانس سوییچی

پریسا محمودی و دکتر سیدابراهیم افجه‌ای

دانشگاه شهید بهشتی

email: parisa_2130@yahoo.com

چکیده

جهت کارکرد صحیح یک موتور رلوکتانسی سوئیچی جریان هر فاز را می‌بایستی در زمانی که اندوکتانس آن فاز رو به افزایش می‌گذارد، به آن اعمال نمود و به این ترتیب انرژی را از منبع تغذیه سیستم به هر یک از فازها منتقل کرد. حال جهت نائل آمدن به چنین نظمی به یک کنترلر و یک مبدل احتیاج داریم. مدارهای راه انداز مختلفی برای حرکت موتور پیشنهاد شده که هر کدام دارای مزیتها و معایبی هستند. روشهای گوناگونی جهت کنترل موتور رلوکتانس سوئیچی وجود دارد. در این روشها سعی شده است که از کمترین اجزاء ممکن جهت کنترل هرچه بهتر و دقیقتر این نوع موتورها استفاده شود. در این مقاله یک مدار جدید از نوع توپولوژی c-dump برای این منظور استفاده شده است. این راه انداز دارای مزیت استفاده از کمترین و ساده ترین اجزاء ممکن می‌باشد. همچنین احتیاج به هیچ نوع کنترل برای تخلیه انرژی خازن نمی‌باشد. این مدار توسط نرم افزار شبیه سازی و همچنین در آزمایشگاه ساخته و با موفقیت آزمایش گردید. نتایج بدست آمده از شبه سازی نتایج آزمایشگاهی را تایید می‌نماید

کلمات کلیدی: ، موتور رلوکتانسی سوئیچی، راه انداز موتور رلوکتانسی، کنترلر موتور رلوکتانس

1- مقدمه

نظر به اینکه موتورهای الکتریکی از مهمترین ابزار در صنعت می‌باشند، تهیه و ارائه ماشینهایی که هزینه نگهداری کمتر با بیشترین بازدهی و قابلیت کنترل را دارا باشند هدف بسیاری از متخصصین و محققین مربوطه می‌باشد. در این راستا، موتورهای رلوکتانس سوئیچی SRM جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده اند. این موتورها به خاطر سادگی در ساخت گونه های مختلف؛ قابلیت کنترل بالا؛ تحمل گرمای زیاد؛ ودوام بسیار آن در بسیاری از کاربردهای روزمره، صنعت، و حتی هوانوردی کارایی فراوانی پیدا نموده اند. برای چرخش و کنترل صحیح این نوع موتورها احتیاج به راه انداز و کنترلر امری ضروری است.

مدارهای راه انداز مختلفی برای حرکت موتور پیشنهاد شده که هر کدام دارای مزیتها و

معایبی هستند. در کل این راه اندازها از لحاظ سوئیچینگ به دو دستهٔ کلید زنی سخت و کلید زنی نرم تقسیم می‌گردند. روشهای گوناگونی جهت کنترل موتور رلوکتانس سوئیچی وجود دارد. در این روشها سعی شده است که از کمترین اجزاء ممکن جهت کنترل هرچه بهتر و دقیقتر این نوع موتورها استفاده شود.

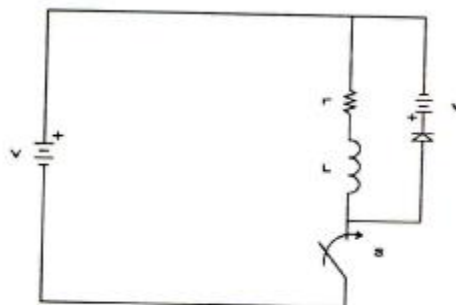
1-1- مدارهای مبدل

مدارهای قطع و وصل در هر موتور رلوکتانسی

شامل دو بخش می‌باشد [6]:

الف- یک کلید کنترل شونده جهت اتصال ولتاژ منبع به سیم پیچ ها تا جریان مورد نظر در آنها راه اندازی گردد. ب- ایجاد یک مسیر تخلیه به هنگام قطع کلید تا انرژی ذخیره شده در سیم پیچ های فازها بتواند در جای دیگری استفاده گردد. این امر علاوه بر افزایش راندمان، ترانزیستورهای قطع و وصل کننده را از ضربه جریان قوی به هنگام قطع مصون می‌دارد.

در شکل (۱) یک مدار بسیار ساده برای موتور رلوکتانسی ترسیم شده است.



شکل ۱: یک مدار ساده جهت قطع و وصل در هر فاز

در شکل فوق معادله کلی که برای مدار و سیم پیچ استاتور می توان نوشت عبارت است از:

$$V = R \cdot i + dL/dt \quad (۱)$$

که در آن ولتاژ اعمالی به دو سر پیچ V و شار داخل سیم پیچ λ است. اگر مدار مغناطیسی سیستم را خطی فرض نمائیم و از مقدار مقاومت صرف نظر می نمائیم، معادله (۱) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$V = L \cdot di/dt + i \cdot dL/dq \cdot dq/dt \quad (۲)$$

لذا میزان تغییرات انرژی انتقال یافته خواهد بود:

$$Vid t = Li \cdot di + i^2 \cdot \frac{dL}{dq} \cdot w \cdot dt \quad (۳)$$

رابطه فوق بیانگر آن است که تغییرات انرژی الکتریکی ورودی به موتور رلوکتانسی بخشی صرف افزایش میدان مغناطیسی ذخیره شده می گردد و بخش دیگر (۴) $(Li \cdot di)$

به صورت تغییرات انرژی مکانیکی خروجی

$$i^2 \cdot dL/d\theta \cdot \omega \cdot dt \quad (۵)$$

تبدیل می گردد. ولی در پایان کار هر یک از فازها می بایستی انرژی ذخیره شده بازیابی گردد.

در این راستا مبدل های مختلفی جهت راه اندازی موتورهای رلوکتانسی پیشنهاد گشته است که این مبدل ها در حالت کلی به مبدل های با کلیدزنی سخت و نرم تقسیم می گردند. [۶]

کلیدزنی که در آن ولتاژ منبع تغذیه به طور کامل در هنگام سوئیچ هر فاز بر روی کلیدها (ترانزیستورها، تریستورها) قرار گیرد را کلیدزنی سخت (Hard Switching) می نامند. در این روش تلفات قابل ملاحظه ای بر روی کلیدها ایجاد شده که در پایین آوردن راندمان مبدل بسیار مؤثر می باشد.

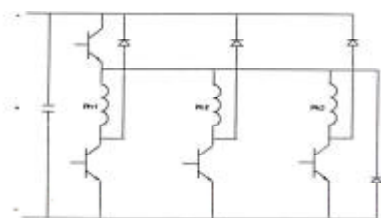
اگر کلیدزنی هنگامی انجام شود که در آن ولتاژ یا جریان در حد صفر قرار داشته باشند، در این صورت تلفات بر روی کلیدها از بین می رود و این نوع کلیدزنی به کلیدزنی نرم معروف است.

این نوع مبدل ها با استفاده از خازن و یا عناصر دیگر سبب تشدید در مدار شده و باعث تقلیل جریان به حد صفر می گردند.

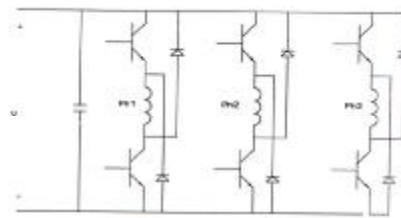
حال به اختصار به بررسی بعضی از آنها می پردازیم:

۱-۱-۱- مبدل دو کلید در هر قطب

در شکل ۲ مبدل دو کلید در هر قطب نشان داده شده است.



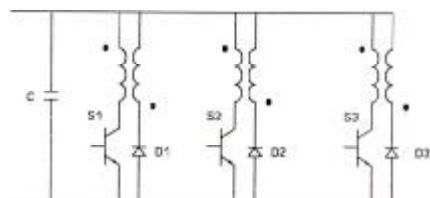
شکل 3: مبدل N+1 کلیدی



شکل 2: مبدل دو کلید در هر قطب

3-1-1- مبدل بای فیلار (Bifilar)

در شکل (4) آرایش مداری مبدل Bifilar ترسیم شده است.



شکل 4: مبدل با سیم پیچی Bifilar

در این روش با ارائه نوعی سیم پیچی در استاتور که به Bifilar معروف است، تعداد سوئیچ ها و دیودها کاهش می یابد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که مدار اولیه و ثانویه توأم سیم پیچی می گردد تا بیشینه تزویج بر روی هر یک از قطب ها مهیا گردد. بدین ترتیب جریان در اولیه هر سیم پیچ زمانی که ترانزیستور مربوط به آن روشن است حرکت می نماید. با خاموش کردن ترانزیستور، جریان اولیه به صفر تنزل می نماید و باعث راه اندازی جریان دیگری در ثانویه می گردد. این جریان سبب می شود که انرژی ذخیره شده در

در مبدل بالا ترانزیستور فوقانی هر یک از قطب ها جهت کنترل میزان جریان آن قطب به کار گرفته می شود و ترانزیستور پایینی در زمان مناسب که بستگی به موقعیت روتور دارد و توسط حس کننده های پدیده هال و یا اپتیک تشخیص داده می شود، مسیر جریان را مهیا می سازد. همچنین انرژی مازاد در سیم پیچ ها در زمان مناسب توسط دیودها به منبع تغذیه بازگردانده می شود. این مبدل توسط محققین مختلفی بررسی و بهینه سازی گشته است.

[7-5-4]

2-1-1- مبدل N+1 کلیدی

در شکل (3) مبدل N+1 ترانزیستوری برای یک موتور N فاز ترسیم شده است. در این مدار فقط یک ترانزیستور جهت کنترل جریان به کار گرفته می شود که مابین کلیه فازها مشترک بوده و این در حالی است که ترانزیستورهای دیگر جهت کارکرد صحیح هر فاز فرمان روشن شدن را دریافت می دارند. در این مدار انرژی ذخیره شده توسط دیودها به منبع اصلی خود بازگردانده می شود.

Q1 جاری بود، توسط عمل کموتاسیون به تریستور Q1f تغییر مسیر می دهد و باعث شارژ خازن C1 می گردد.

افزایش ولتاژ این خازن باعث کاهش جریان فاز مربوطه می گردد و در پایان این روند کل انرژی ذخیره شده در سیستم، در خازن C1 جای خواهد گرفت.

برای بازیابی این انرژی و انتقال آن به منبع تغذیه، تریستور Q4 روشن شده و خازن C1 انرژی خود را با پدیده تشدید از طریق سلف Li درون خازن منبع DC با نام C تخلیه می سازد و این امر تا بدانجا ادامه دارد که تریستور Q4 با صفر شدن جریان IC خاموش گردد. نوع دیگر آرایش مدار C – Dump در شکل (5-ب) ترسیم گشته است. در این توپولوژی به جای سلف Li از یک مقاومت استفاده شده است. حضور این مقاومت باعث آن می گردد که ولتاژ دو سر خازن C1 بالاتر از ولتاژ منبع DC قرار گیرد و بتوان انرژی آن را به خازن C انتقال داد ولی در این روند مقداری از انرژی در داخل خود مقاومت تلف خواهد شد. لذا در مقام مقایسه این مدار بازده کمتری نسبت به آنچه در (5-الف) گفته شد دارد. انرژی تلف شده در داخل مقاومت را می توان چنین محاسبه نمود:

$$E_R = 0.5 \cdot C \cdot (V_C - V_{dc})^2 \quad (6)$$

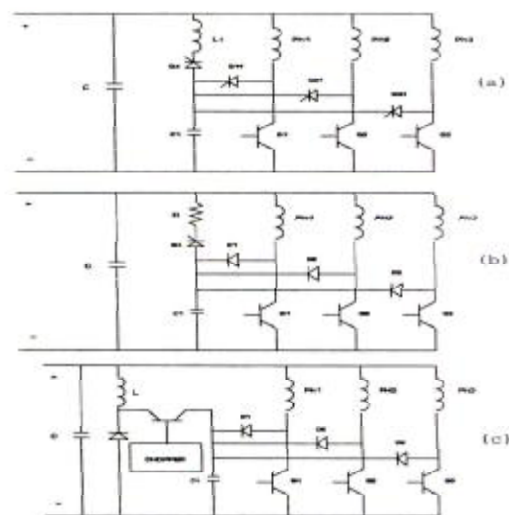
شایان ذکر است که در مدارهای عملی از این دسته، تقریباً یک سوم انرژی ذخیره شده در همین

این فاز از طریق دیود واقع در ثانویه به منبع تغذیه سیستم بازگردانیده شود.

و به گفته میلر [4] مبدل Bifilar یکی از مقرون به صرفه ترین مبدل های این دسته از موتورها است. جزئیات بیشتری از مدار راه انداز Bifilar در منابع [4-9-10-11] ذکر گردیده است.

4-1-1- مبدل های C-DUMP

C – Dump در شکل (5) چند ساختار مختلف ترسیم گشته است. چنین نام گذاری برای این مبدل ها از آنجا صورت گرفته که انرژی ذخیره شده در هر فاز در خازنی انباشته می گردد و در حرکت بعدی موتور، در روی فاز دیگر از آن استفاده می گردد.



شکل 5: الف- مدار تشدید C – Dump

ب- مدار مقاومتی C – Dump

ج- چابر (مبدل مستقیم به متناوب) C – Dump

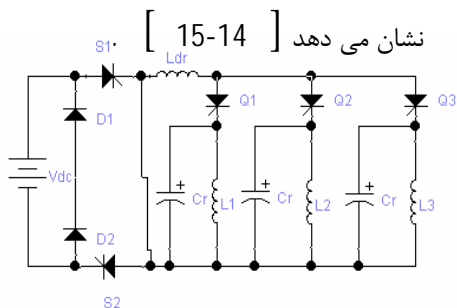
شکل (5-الف) مبدل C – Dump با پدیده تشدید را نشان می دهد. در این مدل وقتی ترانزیستور Q1 قطع می شود جریان فاز PH1 که تا بدان لحظه در

از یک برشگر ولتاژ در دو سر خازن ورودی استفاده شده تا هر گاه میزان ولتاژ آن از ماکزیمم حد تنظیم شده تجاوز کرد، آن را به داخل مقاومت تلف کننده R_{sh} منحرف سازد. البته چنانچه ادوات این مدار اعم از: عناصر قطع و وصل کننده، خازن ورودی و دیود هرزگرد بتوانند تحمل بیشینه بار این سیستم را داشته باشند می توان از R_{sh} چشمپوشی کرد و آن را از مدار حذف نمود.

همان طور که در [13] نیز ذکر شده این مدارها در سیستم های ارزان و ساده کارایی دارند، زیرا آرایش و تعداد عناصر ساده بسیار کم می باشند.

1-1-6- مبدل تشدید سری

در شکل 7 یک مدار مبدل تشدید سری را



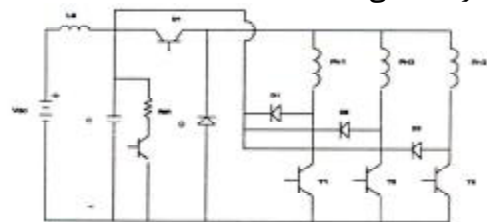
شکل 7: مبدل تشدید سری

در این مبدل خازن C_r و سلف L_{dr} مدار تشدید سری را می سازند. هنگامی که کلید S_1 ، S_2 و Q_1 زده شد، انرژی منبع به طرف فاز L_1 موتور شروع به حرکت می کند. در این هنگام جریان تشدید از L_{dr} شروع به حرکت می کند و ولتاژ خازن C_r نیز شروع به افزایش می نماید. این عمل تا زمانی ادامه دارد که جریان L_{dr} به صفر برسد که در این هنگام Q_1 ، S_1 و S_2 خاموش می گردد و L_1 جریان خود را از C_r تامین می کند

مقاومت تلف می گردد [11-12]. شکل (5-ج) یک مدار $C - Dump$ با اتصال چاپر را بیان می دارد. این مدار که باز هم جهت بازیابی انرژی ذخیره شده می باشد همواره ولتاژ خازن انباره ای را بالاتر از ولتاژ منبع DC سیستم نگاه می دارد و میزان انرژی بازیافتی در هر سیکل را می توان توسط کلید Q_4 کنترل نمود. وقتی کلید چاپر بسته می شود خازن C_1 شروع به تخلیه می نماید و هنگامی که باز است انرژی ذخیره شده در L_1 از طریق دیود هرزگرد D (Freewheeling) به منبع تغذیه باز می گردد.

1-1-5- مبدل ذخیره ساز تک کلید

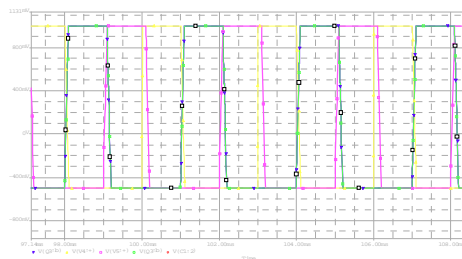
شکل (6) بیانگر مدار مبدل ذخیره ساز تک کلید بر فاز [13] می باشد.



شکل 6: مدار مبدل ذخیره ساز تک کلید بر فاز

در این آرایش ولتاژ با روشن کردن Q_1 و T_1 بر دو سر سیم پیچ PH1 قرار می گیرد. وقتی این دو ترانزیستور قطع می شوند انرژی ذخیره شده در سیم پیچ هر فاز در خازن C تخلیه می شود و این امر بدین صورت است که پلاریته دو سر سیم پیچ عوض شده و شروع به شارژ خازن C می نماید که در نهایت جریان سیم پیچ هر فاز سریع تر تنزل می نماید. این روش باعث آن می گردد که موتور در سرعت های بالا نیز بتواند کارایی داشته باشد. همچنین در این امر

می توان بیان نمود. در این مدار هر سوئیچ با استفاده از یک پالس مربعی (البته $rise\ time$ کوچکی دارد و ایده ال نیست) روشن می شود. پالسی که هر سوئیچ با آن تریگر می شود، دارای یک زمان تاخیر (Delay time) نسبت به بقیه پالس ها است که فاز ها را از هم مستقل می کند. شکل 8 این مطلب را نشان می دهد:



شکل 8: پالس های تریگر کننده سوئیچ ها

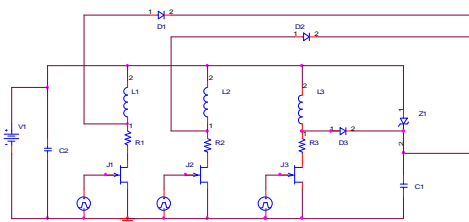
با روشن شدن سوئیچ مربوط به هر فاز جریان راه انداز از طریق منبع در آن جاری می شود و به این ترتیب فاز فعال می گردد و جریان در آن شروع به افزایش می کند.

در این حالت اگر سوئیچ فاز مورد نظر خاموش شود، جریان در آن فاز کاهش می یابد. مسیر تخلیه از طریق دیود هرزگرد مربوط به همان فاز فعال می شود، به این ترتیب که با تغییر پلاریته سلف، انرژی ذخیره شده در آن، در خازن انباشته می شود. شکل های مربوط به شارژ و دشارژ خازن و جریان مربوطه در شکل های 9 و 10 نشان داده شده است.

تا هنگامی که ولتاژ از منبع تغذیه کمتر گردد دوباره عمل توان رساندن به آن فاز با روشن نمودن S_1 ، S_2 ، S_3 ادامه می یابد. عمل بازیابی انرژی ذخیره شده در سلف با تغییر پلاریته خازن، بوسیله روشن نمودن ترستور Q_1 و روشن کردن Q_1 و S_2 ، S_3 انجام می پذیرد. مقایسه توپولوژی های مختلف مدارهای مبدل در مرجع [15] نشان داده شده است. SRM

2- مدار جدید راه انداز برای موتورهای رلکتانسی

در این طرح از خانواده توپولوژی C-dump استفاده شده است. در این توپولوژی از تعداد کمتری المان استفاده شده است و خیلی ساده و ارزان می باشد. شمای کلی مدار در زیر نشان داده شده است.



شکل 7: شمای کلی مدار

از ویژگی های این مدار این است که دارای تعداد المان های کمتری است. بطوریکه سوئیچ در مدار اصلی، با یک دیود زنر جایگزین شده، که خود سبب ساده تر شدن عملکرد مدار، در مسیر تخلیه مبدل گشته است. چون در مدار قبلی برای دشارژ خازن نیاز به استفاده از یک سوئیچ و روشن کردن آن در مسیر تخلیه بود، کار قدری دشوار می شد. این مدار با استفاده از نرم افزار Orcad شبیه سازی گردید. و نتایج آن را بشرح زیر

همانطور که شکل نشان می دهد خازن در هنگام خاموش شدن سیم پیچ فاز شارژ گشته و هنگامی که به ولتاژ شکست دیود رسید دشارژ می گردد و در ولتاژی کمتر از ولتاژ شکست دیود زبر ثابت می شود.

ولتاژ تولید شده از سنسور تشخیص موقعیت روتور برای روشن نمودن ترانزیستور فاز مربوطه در شکل 12 نشان داده شده است.



شکل 12: ولتاژ اعمالی به گیت ترانزیستور فاز مربوطه
حال اگر از ولتاژ خازن را هنگامی که همه فاز ها عمل می کنند و در آن قسمت دی سی حذف گردد خواهیم داشت.

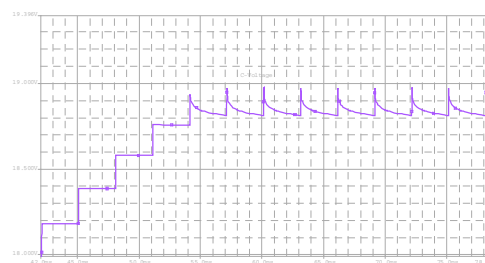


شکل 13: ولتاژ خازن با حذف دی سی
در این شکل شارژ و دشارژ خازن dump کاملاً مشهود است.

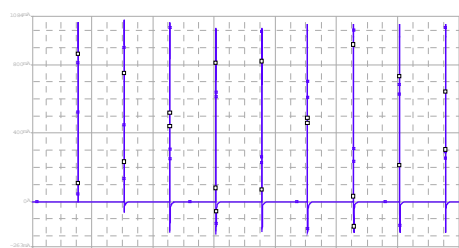
3- نتیجه گیری

در این پروژه یک راه انداز موتور رلوکتانسی سوئیچی جدید، با موفقیت ساخته؛ شبه سازی شد و مورد آزمایش قرار گرفت .

در نیل به این هدف ، با استفاده از مقالات و تجربیات گذشته در ساخت راه اندازها ، توانستیم به ساختاری ساده اما در عین حال کارا دسترسی پیدا کنیم و آنرا بوسیله نرم افزار مربوطه مورد پردازش و تحلیل قرار داده و آن را در آزمایشگاه بسازیم و با موفقیت آزمایش نماییم نتایج حاصل از آن ، با آنچه پیش بینی می شد ، هماهنگ بود.



شکل 9: منحنی ولتاژ خازن



شکل 10: منحنی جریان خازن

اما در این حالت، با شارژ شدن خازن و افزایش ولتاژ دو سر آن، در حقیقت ولتاژ یک سر دیود زبر افزایش می یابد و در یک مرحله از کار، که اختلاف ولتاژ دو سر زبر به مقدار مشخصه آن رسید، باعث شکست دیود زبر می گردد. می توان این مطلب را از منحنی ولتاژ خازن نیز دریافت. به این ترتیب انرژی ذخیره شده در خازن ، که ناشی از تخلیه فاز در حال خاموشی بود، به دلیل اینکه از ولتاژ منبع بیشتر شده از مسیر اتصال کوتاه شده دیود زبر به منبع بر می گردد. با این کار می توان از آن جهت روشن کردن فاز دیگر نیز استفاده کرد.

این مدار در آزمایشگاه ساخته و بر روی یک موتور سه فاز 4x6 رلوکتانس سوییچی 20 وات 12 ولت تست گردید. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده را بدین صورت می توان بیان نمود. ولتاژ خازن در حالت رژیم دائم هنگامی که فقط موتور با یک فاز عمل می نماید در شکل 11 نشان داده شده



شکل 11: ولتاژ خازن

REFERENCES

- [1] P.J. Lawrenson. "Variable-Speed Switched Reluctance Motors," Proceedings IEE, Vol. 127, Pt. B, No. 4, July 1980, pp. 253-265.
- [2] P.J. Lawrenson. "Switched Reluctance Drives-A Fast-Growing Technology," Electric Drives and Control, April/May 1985.
- [3] P.J. Lawrenson. "Switched Reluctance Motor Drive," Electronics & Power, February 1983, pp. 144-147.
- [4] T.J. Miller. Switch Reluctance Motor Drive, Ventura, CA: Intertec Communications Inc, 1988.
- [5] T.J. Miller. "Brushless Reluctance Motor Drives," IEE Power Engineering Journal, Vol. 1, November 1987, pp. 325-331.
- [6] Seyed Mir, "Classification of SRM Converter Topologies for Automotive Application", SAE technical paper series number 000-01-0133, March 6-9, 2000
- [7] M.R. Harris et al. "A review of the Integral-Horsepower Switched Reluctance Motor Drive," IEEE Transactions, Vol. IA-22, No. 4, July/August 1986, pp. 716-721.
- [8] W.F. Ray and R.M. Davis. "Inverter Drive for Doubly-Salient Reluctance Motor: Its Fundamental Behaviour, Linear Analysis and Cost Implications," IEE Electric Power Applications, Vol. 2, No. 6, December 1979, pp. 185-193.
- [9] "Digital Signal Processing Solution for the Switched Reluctance Motor", Texas Instrument literature no. BPRA058, July 1997, pp. 1-19
- [10] T.J. Miller. "Converter Volt-Ampere Requirements Of The Switched Reluctance Motor Drive," IEEE Transactions, Vol. IA-21, 1985, pp. 1136-1144.
- [11] J.T. Bass, M. Ehsani, and T.J. Miller. "Development of a Unipolar Converter for Variable Reluctance Motor Drives," IEEE Transactions, Vol. IA-23, 1987, pp. 545-553.
- [12] T.J. Miller and T.M. Jahns. "A Current Controlled Switched Reluctance Drive For FHP Applications," Conference on Applied Motion Control, Minneapolis, June 1986, pp. 109-117.
- [13] R. Krishnan and P.N. Materu. "Design of a Single-Switch-Per-Phase Converter for Switched Reluctance Motor Drives," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 6, December 1990, pp. 169-476.
- [14] E. Afjei, "A new resonant converter circuit for reluctance motor", International journal of engineering, Vol. 12, May 1999, pp. 69-80
- [15] Gabriel Gallegos-Lopez, J. Walters, K Rajahekarta, "Switched reluctance machine control strategies for automotive applications", SAE technical paper series number 2001-01-0995, March 5-8, 2001
- [16] E. Afjei and A. Aujloo. "A low cost sensorless control drive circuit for a low voltage switched reluctance motor". International Journal of Engineering. Vol 14, No. 3 pp. 201-208, 2001
- [17] M. Ehsani, H. Husain, S. Mahajan, and K.R. Ramani, "New modulation encoding techniques for indirect rotor position sensing in switched reluctance motors", IEEE Trans, Ind. Applicat, vol. 30 85-91. Jan/ Feb. 1994.



- [18] J.T. Bass, M. Ehsani, and T.J. Miller, "Simplified Electronics for Torque Control of Sensorless Switched Reluctance Motor," IEEE Transactions, Vol. IE-34, No. 2, May 1987, pp. 234-239.
- [19] E. Afjei, H. Toliyat, "A Novel Multilayer Switched reluctance motor, Submitted and Accepted for publication in IEEE Trans, Energy conversion, for march 20
- [20] E. Afjei, M Fallah "An Efficient drive circuit for reluctance motor", " , International journal of engineering, Vol.12, No. 3, Aug. 1999, pp. 137-143
- [21] S. Coly, M. Mottier, T.J. Miller, "Vibration and acoustic noise in a four phase switched reluctance motor", IEEE Tran. On Ind. Appl., vol. 32, no. 6, Nov. 1996, pp 1357-1364
- [22] Iqbal Husain, M. Ehsani, "Torque ripple minimization in SRM drives by pwm current control", IEEE tran. On Ind. Appl., 1994, pp. 72-77