

تحسين خصائص المحرك المعاوق المفتاحي في المركبات الكهربائية بالاعتماد على تغيير عوامل التركيب الهندسي - مراجعة

عمر شرف الدين يحيى
o.yehya@uomosul.edu.iq

سيف خالد سلطان الفرحان
saif.21enp17@student.uomosul.edu.iq

قسم الهندسة الكهربائية، كلية الهندسة، جامعة الموصل، الموصل، العراق

استلم بصيغته المنقحة: June 27th, 2023 تاريخ القبول: August 1st, 2023

تاريخ الاستلام: April 27th, 2023

الخلاصة

جذبت مكائن المعاوقة المفتاحية (Switched Reluctance Machines - SRMs) في السنوات الأخيرة اهتماماً متزايداً في تطبيقات المركبات الكهربائية (Electric Vehicles - EVs) بسبب الأسعار المنخفضة للمغناطيس الأرضية النادرة (Permanent Magnets - PMs) المستخدمة في المكائن التزامنية ذات المغناطيس الدائم (Permanent Magnet Synchronous Machines - PMSMs)، كما تتميز ببناء متين وقوي. فضلاً عن، عملها بسرعات عالية ودرجات حرارة عالية. ومع ذلك، فإن السلبيات المتمثلة بالضوضاء الصوتية العالية، وتموجات عزم الدوران العالية، بالإضافة إلى كثافة عزم الدوران المنخفضة نسبياً تمثل تحديات كبيرة للباحثين في إيجاد الحلول المناسبة، حيث يتم استخدام تقنيات تحسين التركيب الهندسي للتغلب على هذه التحديات وتمكين مكائن المعاوقة المفتاحية (SRMs) من التنافس مع المكائن التزامنية ذات المغناطيس الدائم (PMSMs)، من ناحية أخرى يمكن تحسين توزيع المواد المستخدمة في التركيب الهندسي لمكائن المعاوقة المفتاحية ضمن مساحة تصميم معينة داخل هيكل الماكينة باستخدام تقنيات تحسين التركيب الهندسي. تقدم هذه الدراسة مراجعة عن تقنيات تحسين التركيب الهندسي لمكائن المعاوقة المفتاحية (SRMs) لتحسين أداء الماكينة، نظراً لأن تحسين هندسة الماكينة وتوزيع المواد في مرحلة التصميم له أهمية كبيرة في تحسين أداء وخصائص مكائن المعاوقة المفتاحية (SRMs).

الكلمات المفتاحية

مكائن المعاوقة المفتاحية؛ المركبات الكهربائية؛ متوسط العزم؛ الكفاءة؛ تموج العزم؛ الضوضاء الصوتية؛ القوة الشعاعية.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://rengj.mosuljournals.com>

Email: alrafidain_engjournal1@uomosul.edu.iq

1. المقدمة

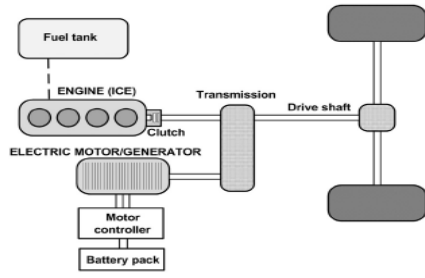
المركبات الكهربائية والمركبات الكهربائية الهجينة [16]، [17]، والسبب هو أن لديهم بنية بسيطة وعرة بدون أي مغناطيس أو لفات على الجزء الدوار [18]، حيث يسمح عدم وجود المغناطيس الدائمة (PMs) واللف على الدوار للماكينة بالعمل في درجات حرارة عالية وسرعات عالية [19]، كما أنه يقلل من وزن الدوار، مما يزيد من نسبة عزم الدوران إلى عزم القصور الذاتي للماكينة ويحسن الأداء الديناميكي مقارنة بالمكائن الحثية (Induction Machines - IMs) والمكائن التزامنية ذات المغناطيس الدائم (PMSMs) [20]، [21]. بالإضافة إلى ذلك فإن عدم وجود المغناطيس الدائمة (PMs) الأرضية النادرة من تصميم الماكينة يجعل المحرك المعاوق المفتاحي بديلاً منخفض التكلفة للمكائن القائمة على المغناطيس الدائم. في هذا البحث تم توضيح معمارية المركبات الكهربائية في الفقرة (2)، وتوضيح أنواع مكائن المعاوقة المفتاحية مع إيجابياتها وسلبياتها في الفقرة (3)، ويتم توضيح التحليل الرياضي متمثلاً بالقيمة الأنوية ومتوسط العزم والقوة الدافعة الكهربائية الطبيعية العكسية في الفقرة (4)، وتوضح الفقرة (5) دوال الهدف لتحسين خصائص المحرك المعاوق المفتاحي، فضلاً عن توضيح التصميم

بالمقارنة مع مركبات الوقود التقليدية، يمكن للمركبات الكهربائية (Electric Vehicles - EVs) والمركبات الكهربائية الهجينة (Hybrid Electric Vehicles - HEVs) أن تقلل من استنفاد الوقود الأحفوري (fossil fuels) والاحتراق العالمي (global warming)، وأصبحت أكثر انتشاراً لتحل محل مركبات الوقود التقليدية [8]–[1]، تلعب المحركات الكهربائية دوراً مهماً في تطوير المركبات الكهربائية، حيث أن من متطلبات محركات الجر للمركبات الكهربائية هي كثافة عزم دوران عالية وكثافة قدرة عالية، عزم دوران عالي لبدء التشغيل، وسرعة منخفضة، وقدرة عالية للانطلاق بسرعة عالية ومدى سرعة واسع مع مدى تشغيل ثابت للقدرة يبلغ حوالي 3-4 أضعاف السرعة الأساسية، كفاءة عالية على مدى السرعة الواسعة وعزم الدوران بما في ذلك تشغيل عزم الدوران المنخفض، قدرة التحميل الزائد المتقطع، و ضعف عزم الدوران المقنن لفترات قصيرة، موثوقية ومتانة عالية تتناسب مع بيئة المركبة، ضوضاء صوتية منخفضة، كلفة مقبولة [15]–[9]. حيث أصبحت مكائن المعاوقة المفتاحية (SRMs) الآن اختيارات جذابة لتطبيقات مختلفة مثل

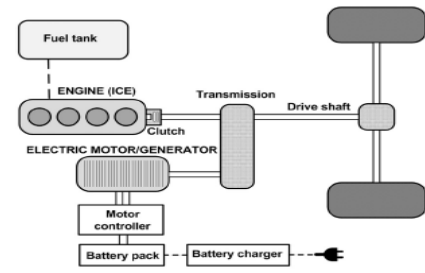
والتحسين متعدد الاهداف لمحركات المعاوقة المفتاحية في الفقرة (6) والاستنتاجات في الفقرة (7).

2. معمارية المركبات الكهربائية EVs Architectural

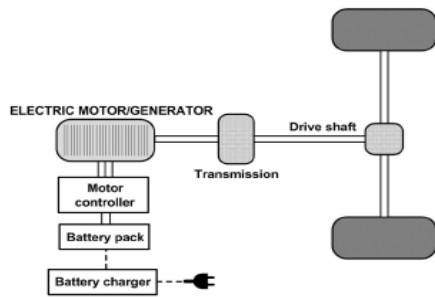
مفهوم المركبة الكهربائية ليس جديداً ولكنه ظهر في أواخر التسعينيات [22]، المركبة الكهربائية (EV) هي أي مركبة يتم توفير قوتها الدافعة جزئياً أو كلياً من حقيبتي بطاريات محمولة على متنها [23]. هناك ثلاثة أنواع رئيسية من المركبات الكهربائية وهي المركبات الكهربائية الهجينة (hybrid electric vehicles - HEVs) والمركبات الكهربائية (electric vehicles - EVs) والمركبات الكهربائية الموصولة بالكهرباء (Plug-in Hybrid Electric Vehicles - PHEVs) والمركبات الكهربائية الكاملة (Full Electric Vehicles - FEVs) التي تظهر تركيباتها الرئيسية في الشكل 1. تسمح المركبات الكهربائية ذات السعة التخزينية للطاقة بالعمل في وضع الكبح المتجدد، وبالتالي تحويل بعض الطاقة الحركية المفقودة أثناء الكبح أو الكبح إلى كهرباء والتي يتم تخزينها في البطارية، يتم استخدام الطاقة المخزونة لاحقاً لتشغيل المحرك عندما تعمل المركبة في الوضع الكهربائي وبهذه الطريقة يمكن زيادة مدى القيادة بنسبة 10-25٪ [25]. نظراً لأن المركبات التي تستخدم محركات الاحتراق الداخلي (Internal Combustion Engines - ICE) أقل كفاءة من المركبات الكهربائية فإن الأخيرة تخفض بشكل كبير من تكاليف التشغيل [25]، تسمح المركبات (PHEVs) و (FEVs) بإعادة شحن البطارية خارجياً من الشبكة [23]، وبالتالي زيادة كفاءة تحويل الطاقة وخفض انبعاثات الغازات فيما يتعلق بالمركبات الكهربائية الهجينة حيث يتحسن كلاهما عند زيادة مدى وضع استنفاد الشحن [26]. يتم تشغيل المركبات (FEVs) بالكامل بواسطة الشبكة، لذا فهي تعمل في وضع استنفاد البطارية مما يتطلب حزمة بطارية أكبر، بينما في (HEVs) و (PHEVs) يمكن أن يعمل محرك الاحتراق الداخلي (ICE) بمثابة إعادة شحن البطارية أو لدفع المركبة مباشرة أو مجتمعة مع المحرك الكهربائي. تقدم (FEVs) مدى سفر أقل ويرجع ذلك أساساً إلى قيود السعر والوزن لتقنية البطارية الحالية، نظراً لوجود محرك الاحتراق الداخلي (ICE) ومولد كهربائي / محرك كهربائي فإن (HEVs) و (PHEVs) مجتمعة تتضمن مكونات أكثر من (FEVs) وبالتالي يتطلب المزيد من المحركات / المولدات الكهربائية المدمجة.



ب - المركبة الكهربائية الهجينة (HEV)



ج - المركبة الكهربائية الموصولة بالكهرباء (PHEV)



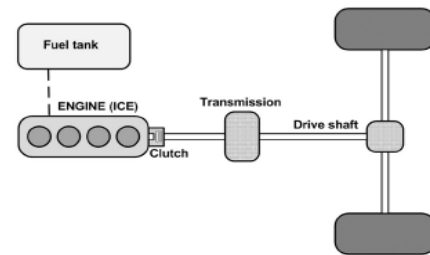
د - المركبة الكهربائية الكاملة (FEV)

الشكل 1. تكوينات أنواع مختلفة من المركبات الكهربائية [9].

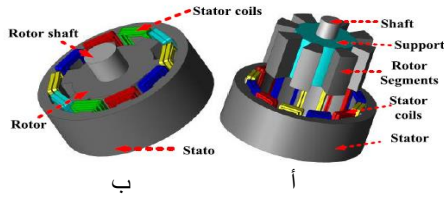
يتم استخدام المحرك المعاوق المفتاحي بشكل أساسي في عجلات المركبات الكهربائية وكما موضح في الشكل 2.



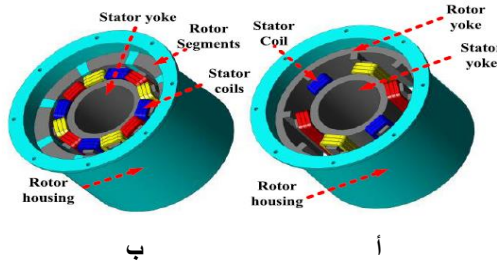
الشكل 2. نموذج هندسي لمحرك معاوق مفتاحي داخل عجلة مركبة كهربائية [27].



أ - مركبة الاحتراق الداخلي (ICE)



الشكل 4. مكانن معاوقة مفتاحية ذات فيض شعاعي بدون هيكل (أ- محرك معاوقي مفتاحي ذو دوار مجزأ وذو أقطاب 12/8 ب- محرك معاوقي مفتاحي خماسي الطور ذو أقطاب 10/6) [30].



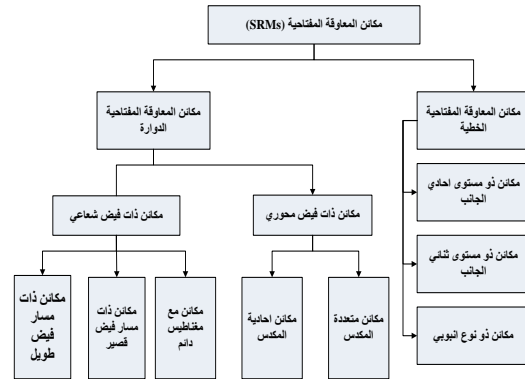
الشكل 5. مكانن معاوقة مفتاحية ذات فيض شعاعي ذات هيكل (أ- محرك معاوقي مفتاحي ذو دوار غير مجزأ وأقطاب 6/8 ب- محرك معاوقي مفتاحي ذو فيض قصير ودوار مجزأ وأقطاب 12/8) [30].

3.1.2 مكانن المعاوقة المفتاحية الدوارة ذات الفيض المحوري Axial Flux SRMs

في مكانن المعاوقة المفتاحية ذات الفيض المحوري (Axial Flux Switched Reluctance Motors - AFSRMs) ينتقل الفيض محورياً بين الجزء الثابت والدوار نظراً لمسار الفيض الأقصر نسبياً، تتمتع محركات (AFSRM) بكثافة قدرة أعلى من مكانن المعاوقة المفتاحية ذات الفيض الشعاعي [33]. بناءً على هيكل الماكينة وعدد الأجزاء الثابتة والدوارة المستخدمة في الماكينة، يمكن تصنيف (AFSRMs) إلى ثلاث فئات رئيسية كما هو موضح في الشكل 6، تشمل هذه الفئات ماكينة أحادية الجزء الدوار (من جانب واحد) وماكينة ذات فجوة هوائية (مزدوجة الجوانب) وماكينة متعددة المكسد. تتمثل إحدى المشاكل الحاسمة في هذا التركيب في عدم التوازن بين القوى المحورية للجزء الثابت والدوار مما ينتج عنه ضوضاء صوتية عالية ويلزم استيعابها في تصميم المحمل [34]. هناك نوعان من (AFSRMs) أحادي الجانب: النوع الدوار المسنن والنوع الدوار المقسم، كما هو موضح في الشكل 7 والشكل 8 على التوالي [33]، يتكون الجزء الثابت من النوع ذي الأسنان الدوارة من هيكل وأسنان وملفات، بينما يتكون الجزء الدوار من هيكل وأسنان بدلاً من ذلك. يتكون الجزء الثابت من النوع الدوار المجزأ من أسنان ملفوفة وأسنان مساعدة وهيكل [33]، يتكون الجزء الدوار من أجزاء منفصلة مرتبطة ببعضها البعض بواسطة مادة غير مغناطيسية مثل الألومنيوم أو البلاستيك، هذا التركيب لماكينة المعاوقة المفتاحية له خسائر نحاسية أقل، كما أن لديها خسائر قلب حديدي أقل بسبب أقطاب الجزء الثابت المساعدة التي توفر مسار فيض أقصر ويقبل استخدام البلاستيك أو الألومنيوم في الدوار لتثبيت مقاطع الدوار من تأثير عزم القصور الذاتي للمحرك مما يحسن من الأداء الديناميكي للماكينة

3. الانواع الرئيسية لمكانن المعاوقة المفتاحية Main Configuration of SRMs

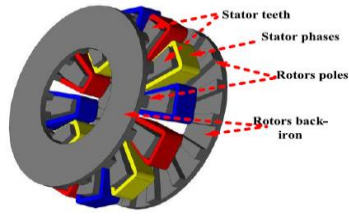
يمكن تصنيف مكانن المعاوقة المفتاحية بناءً على نوع الحركة إلى نوعين الخطية والدوارة وتقسّم الأخيرة على أساس اتجاه الفيض المغناطيسي إلى مكانن الفيض الشعاعي والمحوري. هناك العديد من مجموعات القطب الثابت / الدوار من مكانن المعاوقة المفتاحية، يتم تحديد عدد أسنان الجزء الدوار والجزء الثابت بالإضافة إلى عدد الأطوار لضمان تصميم عملي لمكانن المعاوقة المفتاحية [28]. تم توضيح معظم تركيبات التصميم الممكنة للجزء الثابت / أقطاب الجزء الدوار في [29]، يحدد اختيار الماكينة وأقطاب الجزء الثابت / الدوار الأداء ويعتمد بشكل كبير على نوع التطبيق [29]. يوضح الشكل 3 تصنيفاً للمحرك المعاوقي المفتاحي على أساس التركيب. في هذا القسم، يتم عرض التركيب والمزايا والعيوب والتطبيقات الخاصة بمختلف مكونات المحرك المعاوقي المفتاحي.



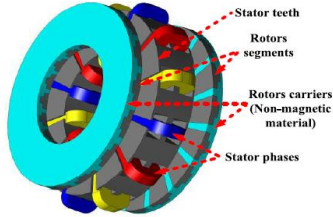
الشكل 3. التركيبات الرئيسية لمكانن المعاوقة المفتاحية [30].

3.1 مكانن المعاوقة المفتاحية الدوارة Rotary SRM 3.1.1 مكانن المعاوقة المفتاحية الدوارة ذات الفيض الشعاعي Radial Flux SRMs

تشتمل تركيبات مكانن المعاوقة المفتاحية ذات الفيض الشعاعي على المسار الطويل التقليدي والمسار القصير المقترن بشكل متبادل ومكانن المعاوقة المفتاحية المدعومة من المغناطيس الدائم، تقليدياً يتدفق الفيض من خلال الحديد الخلفي للجزء الثابت، في تركيب المسار القصير يتدفق الفيض في حلقات قصيرة تحتوي على أطراف الجزء الدوار والجزء الثابت والأقطاب المجاورة وهذا الأخير له خسائر قلب حديدي أقل نسبياً، ومع ذلك فإنه يحتوي على مائة أعلى بين الأطوار مما يقلل من قدرة الماكينة على تحمل العطل [31]. يمكن إضافة المغناطيس الدائمة (PMs) إلى الجزء الثابت في المكانن المدعومة بالمغناطيس الدائم لزيادة القدرة المشتركة للماكينة، مما يزيد من كثافة عزم الدوران والكفاءة [32]. يمكن أن تكون مكانن الفيض الشعاعي بدون هيكل أو ذات هيكل خارجي كما هو موضح في الشكل 4 والشكل 5 على التوالي، يمكن أن يكون الجزء الدوار غير مجزأ أو مجزأ، كما هو مبين في الشكل 4 لتركيبة بدون هيكل والشكل 5 لتركيبة ذو هيكل خارجي.

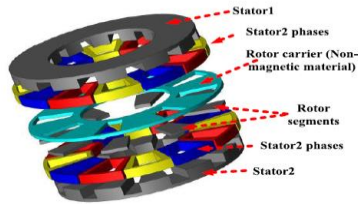


الشكل 9. محرك معاوقي مفتاحي ذو فيض محوري ودوار مسنن احادي الثابت ثنائي الدوار واقطاب 12/16 [30].



الشكل 10. محرك معاوقي مفتاحي ذو فيض محوري ودوار مجزأ احادي الثابت ثنائي الدوار واقطاب 12/16 [30].

عادة ما يتم استخدام مكائن (AFSRM) ثنائي الجزء الثابت الداخلي، كما هو موضح في الشكل 11 كمشغل داخل العجلة للمركبة الكهربائية [41], [40]. يكون الجزء المتحرك مجزأ ومحاصر بواسطة ساكنين خارجيين متطابقين [42]، هذه الهيكلية لها طول محوري صغير بسبب عدم وجود هيكل دوار [41].

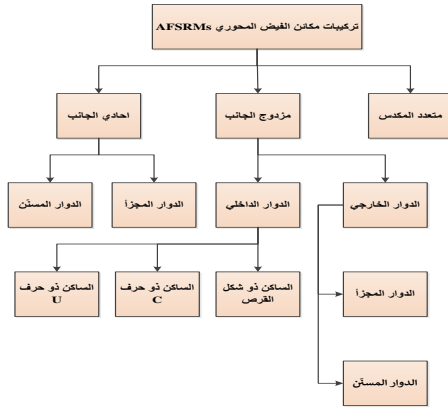


الشكل 11. محرك معاوقي مفتاحي ثلاثي الأطوار مزدوج الثابت و الدوار الداخلي واقطاب 12/8 [30].

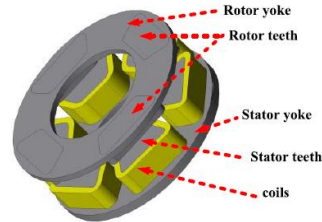
3.2 مكائن المعاوقة المفتاحية الخطية Linear SRMs

تمتلك مكائن المعاوقة المفتاحية الخطية (Linear Switched Reluctance Motors -LSRMs) هيكلًا مشابهًا لمكائن المعاوقة المفتاحية الدوارة، باستثناء أن الجزء الثابت والدوار لهما شكل خطي، وهي تتألف من الجزء الثابت والمتحرك (الجزء الدوار) [43]. تتألف مكائن (LSRMs) من تركيبات مستوية وأنبوية، يوضح الشكل 12 ماكينة (LSRM) ذو مستوى احادي الجانب ثلاثية الطور مع متحرك رباعي الأقطاب حيث ان العيب الرئيسي من النوع الأحادي هو القوى المحورية غير المتوازنة العالية بين الجزء الثابت والمتحرك مما يتسبب

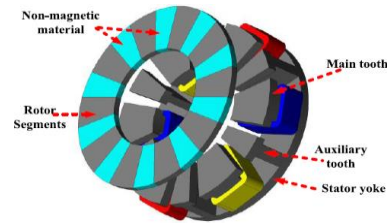
[35]. تتمتع مكائن (AFSRM) مزدوجة الجانب بقوة محورية متوازنة، ويتم استخدام الحجم المتاح لهذه الماكينة بشكل أكثر فاعلية لإنتاج عزم الدوران [36], [35]. قد يكون لهذا التركيب دواران خارجيان (تركيب ثنائي الدوار) أو جزئين ثابتين خارجيين (تركيب داخلي للدوار)، يشتمل التركيب الثنائي الدوار إما على دوارات مسننة [37]، أو مجزأة [38]، كما هو موضح في الشكل 9 والشكل 10 على التوالي. يوفر الهيكل الدوار المجزأ عزم دوران وكفاءة أعلى من الهيكل الدوار المسنن [39]، ترجع الزيادة في عزم الدوران لنوع الجزء الدوار المجزأ إلى مسار الفيض القصير الذي يوفر تدفق فيض أعلى مقارنة بالدوار المسنن [39].



الشكل 6. الطوبولوجيا الرئيسية لمحركات المعاوقة المفتاحية ذات الفيض المحوري [30].

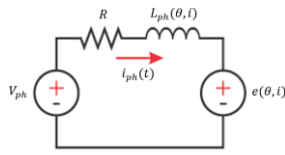


الشكل 7. المحرك المعاوقي المفتاحي ذو الفيض المحوري ذو اسنان احادية الجانب [30].



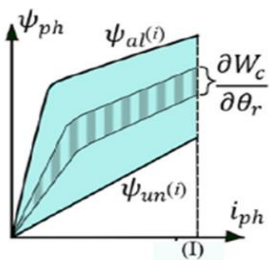
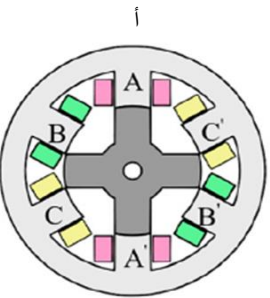
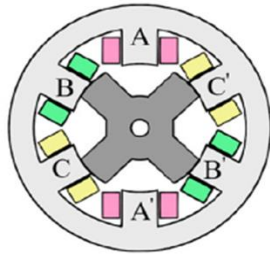
الشكل 8. المحرك المعاوقي المفتاحي ذو الفيض المحوري احادي الجانب والدوار المجزأ [30].

θ_r : موقع الدوار، R : مقاومة ملف الثابت لكل طور. ويوضح الشكل 14 الدائرة المكافئة لكل طور للمحرك المعاوي المفتاحي.



الشكل 14. الدائرة المكافئة لكل طور للمحرك المعاوي المفتاحي

يوضح الشكل 15 (أ و ب) على التوالي مواقع الدوار في حالة اللامحاذاة θ_{un} وفي حالة المحاذاة θ_{al} .

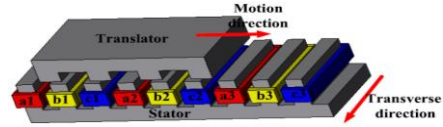


الشكل 15. توضيح محرك معاوي مفتاحي ذو اقطاب 6/4 (أ- الطور A في موقع اللامحاذاة للدوار ب- الطور A في موقع المحاذاة للدوار ج- خصائص $\psi - i$ مسار التيار الثابت المحقون بين مواقع الدوار اللامحاذاة والمحاذاة) [54].

عادةً يتم حقن نبضة تيار مستمر في لف الطور ممتداً من المواقع غير المحاذاة إلى المواقع المحاذاة كما هو مذكور في المعادلة 2 [51]:

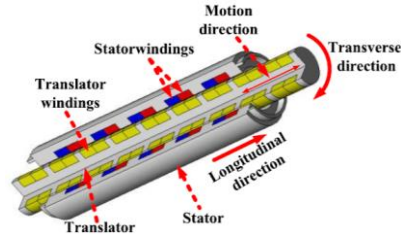
$$i_{ph} = \begin{cases} I, & \theta_{un} < \theta_r < \theta_{al} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

في احتكاك هائل بين كلا الجزأين، من المحتمل أن يقلل الاحتكاك من عمر الماكينة [44]. يمكن للمحرك (LSRM) من النوع الثنائي (على الوجهين) مع فجوتين هوائيتين متساويتين حل هذه المشكلة [45].



الشكل 12. محرك معاوي مفتاحي خطي ثلاثي الطور ذو مستوى أحادي الجانب ومتحرك ذو أربعة أقطاب [30].

يتكون المحرك (LSRM) من النوع الانبوبي الموضح في الشكل 13، من الجزء الثابت ذو جزء انبوبي معدني وجزء متحرك أسطواني [46]، يمنع تركيب محور الدوران الدقيق القوى المغناطيسية الشعاعية غير المتوازنة على عكس (LSRM) من نوع أحادي وثنائي، ولذلك فإن (LSRM) من النوع الانبوبي لا يحتوي على قطع مستعرض وله توزيع موحد للمجال المغناطيسي في الاتجاه المحيطي. يشتمل (LSRM) من النوع الانبوبي على أنواع الفيض المستعرض [47], [48]، وأنواع الفيض الطولي [49]، وفقاً لاتجاه الفيض للجزء المتحرك حيث يوضح الشكل 13 ملفاً مزدوج الإثارة و يكون كل من الجزء الثابت والمتحرك مثاراً وفيض طولي أنبوبي لماكينة معاوقة مفتاحية خطية [50].



الشكل 13. محرك معاوي مفتاحي خطي مزدوج الإثارة ذو لف انبوبي وفيض طولي [30].

4. القيمة الآتية ومتوسط العزم والقوة الدافعة الكهربائية الطبيعية العكسية Instantaneous and Average Normalized Back-emf and Torque

يوضح هذا القسم تقديم تعابير عن القيم اللحظية والمتوسطة للقوة الدافعة الكهربائية وعزم الدوران لحقن نبضات تيار مستمر [51].

4.1 فولتية الطور و تيار الإثارة للمحرك المعاوي المفتاحي Phase Voltage and Excitation Current of SRM

ترتبط فولتية الطور (v_{ph}) وتيار الطور i وتدفق الفيض (ψ_{ph}) [18], [52], [53]:

$$v_{ph} = i_{ph}R + \frac{\partial \psi}{\partial i_{ph}} \frac{di_{ph}}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} \quad (1)$$

يمكن حساب متوسط عزم الدوران الإجمالي T_{avg} من متوسط عزم دوران الطور محسوباً عند دورة كهربائية واحدة مضروباً في عدد الاطوار q كما هو موضح في المعادلة 9:

$$T_{avg}(I) = \frac{qN_r}{2\pi} \int_{\theta_{un}}^{\theta_{al}} T_{ph}(I, \alpha_r) d\alpha_r \quad (9)$$

$$T_{avg}(I) = \frac{qN_r}{2\pi} \int_0^I \psi_{al}(i) - \psi_{un}(i) di \quad (10)$$

يمثل التكامل في الطرف الايمن للمعادلة 10 منطقة الحلقة المشار إليها باللون الأزرق في الشكل 13 (ج) [52], [18]، تتوافق هذه المنطقة مع القدرة المحولة لكل دورة كهربائية في دوران ميكانيكي كامل واحد (qN_r)، يمكن أيضاً اعتبار هذا عدداً من الضربات لكل دوران.

4.5 متوسط عزم الدوران والقوة الدافعة الكهربائية العكسية Average Torque and Average Back-emf Substituting

بتعويض المعادلة 5 في المعادلة 10، يمكن التعبير عن متوسط عزم الدوران بدلالة متوسط القوة الدافعة الكهربائية الطبيعية العكسية كما هو موضح أدناه:

$$T_{avg}(I) = q \int_0^I e_{bnavg}(i) di \quad (11)$$

تثبت المعادلة 11 أن متوسط عزم الدوران للمحرك المعاوي المفتاحي يتناسب مع المنطقة الواقعة تحت متوسط القوة الدافعة الكهربائية الطبيعية (e_{bnavg}) مقابل تيار الطور (i_{ph}).

5. دوال الهدف لتحسين خصائص المحرك المعاوي Objective Functions for Performance Improvement of SRMs

تشمل هذه الأهداف تقليل القوة الشعاعية لتقليل الضوضاء الصوتية واهتزاز الماكينة، أعظم عزم الدوران، وتقليل تموج عزم الدوران، وأعظم الكفاءة.

5.1 القوة الشعاعية والضوضاء الصوتية Radial Force and Acoustic Noise

تعتبر مكونات القوة الشعاعية العالية في المحرك المعاوي المفتاحي أحد التحديات الكبيرة، القوة الشعاعية هي المصدر الرئيسي للاهتزاز والضوضاء الصوتية في المحرك المعاوي المفتاحي [56], [55], [18]، وبالتالي فإن تحليل الضوضاء الصوتية في المحرك المعاوي المفتاحي وخفضها يحظى باهتمام كبير بين الباحثين [58], [57]. في مكان المعاوقة المفتاحية والمكان الكهربائي بشكل عام هناك ثلاثة مصادر أساسية للضوضاء الصوتية والاهتزازات: المصادر الميكانيكية والمصادر الهوائية والمصادر الكهرومغناطيسية [59]، حيث تركز المراجعة في هذا البحث على المصدر الكهرومغناطيسي للضوضاء الصوتية ويرتبط السبب الكهرومغناطيسي للضوضاء الصوتية واهتزازات المحرك المعاوي المفتاحي بإثارة الماكينة والتي تولد ضغطاً شعاعياً على هيكل الماكينة يمكن أن يؤثر

4.2 القيمة الآنية ومتوسط القوة الدافعة الكهربائية الطبيعية العكسية Instantaneous and Average Normalized Back-emf

بالنسبة لنبضة التيار المحقون (i_{ph}) يتم إعطاء قيمة القوة الدافعة الكهربائية الطبيعية الآنية (e_{bn}) في المعادلة 3 [51]:

$$e_{bn}(i_{ph}, \theta_r) = \begin{cases} \frac{\partial \psi(I, \theta_r)}{\partial \theta_r}, & \theta_{un} < \theta_r < \theta_{al} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

I : تيار الجزء الثابت لكل طور.

يتم إعطاء متوسط القوة الدافعة الكهربائية الطبيعية (e_{bnavg}) المحسوب على دورة كهربائية واحدة (أي $2\pi/N_r$) في المعادلة 4 حيث N_r هو عدد أقطاب الدوار.

$$e_{bnavg}(I) = \frac{N_r}{2\pi} \int_{\theta_{un}}^{\theta_{al}} \frac{\partial \psi(I, \alpha_r)}{\partial \alpha_r} d\alpha_r \quad (4)$$

$$e_{bnavg}(I) = \frac{N_r}{2\pi} (\psi(I, \theta_{al}) - \psi(I, \theta_{un})) \quad (5)$$

$$\triangleq \frac{N_r}{2\pi} (\psi_{al}(I) - \psi_{un}(I))$$

α_r : معامل قوس القطب الدوار والذي يمثل النسبة بين قوس قطب الدوار الى موقع الدوار.

3.4 العزم الآني بدلالة الطاقة المشتركة Instantaneous Torque in Terms of Co-energy

يتم إعطاء عزم الطور الآني للمحرك المعاوي المفتاحي $T_{ph}(i_{ph}, \theta_r)$ عند تيار طور معين وموقع الدوار من حيث معدل تغير الطاقة المشتركة (w_c) فيما يتعلق بموقع الدوار (θ_r) في المعادلة 6.

$$T_{ph}(i_{ph}, \theta_r) = \begin{cases} \frac{\partial w_c(I, \theta_r)}{\partial \theta_r}, & \theta_{un} < \theta_r < \theta_{al} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$w_c(I, \theta_r) = \int_0^I \psi(i, \theta_r) \cdot di \quad (7)$$

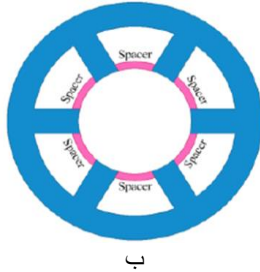
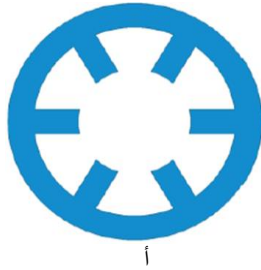
بتعويض المعادلة 7 في المعادلة 6، يمكن التعبير عن عزم الطور الآني كدالة للقوة الدافعة الكهربائية العكسية كما هو موضح [53]:

$$T_{ph}(i_{ph}, \theta_r) = \int_0^I \frac{\partial \psi(i, \theta_r)}{\partial \theta_r} \cdot di \triangleq \int_0^I e_{bn}(i, \theta_r) \cdot di \quad (8)$$

يمكن استخدام المعادلة أعلاه لمعرفة عزم الدوران الآني لكل طور عند تيار طور معين وموقع دوار.

4.4 معادلة متوسط عزم الدوران للمحرك المعاوي المفتاحي Average Torque Equation of SRM

الأسطواني [62]. تمت مناقشة تأثيرات أنواع الإطارات المختلفة وأنواع التبريد في [63]. في [64] تم استبدال أسافين الشقوب (Slot Wedges) التقليدية في المحرك المعاوي المفتاحي بفواصل هيكلية ثابتة مصنوعة من مواد صلبة غير مغناطيسية (يفضل السيراميك)، يوضح الشكل 17 هيكل الجزء الثابت مع وبدون فواصل لمحرك معاوي مفتاحي رباعي الطور ذو أقطاب 8/6. يمكن أن يؤدي هذا التعديل في تصفيح الجزء الثابت إلى تقليل الاهتزاز وتأمين اللفائف، تم اقتراح تصميم بسيط لدوار أسطواني في [62] من خلال توصيل الأقطاب البارزة بأضلاع رفيعة لتقليل الضوضاء الصوتية عند سرعات دوران عالية في [65]. تم تقديم دراسة حول الاهتزازات والضوضاء الصوتية من خلال تحليل مادة وهيكل الجزء الثابت ويتم توفير طريقة تحسين على هيكل المحرك. في [63]. يتم التحقق من تقليل الضوضاء الصوتية عن طريق تصميم سُمك الهيكل والأشكال من أجل مكانن معاوفة مفتاحية عالية السرعة مقارنة بهيكل المحرك التقليدي. يُقترح استخدام محرك معاوي مفتاحي مزدوج الجزء الثابت (Double Stator Switched Reluctance Motor -DSSRM) لتقليل القوة الشعاعية في [66], [67]، كما هو موضح في الشكل 18، يتم تجميع الجزء الدوار بين الجزء الثابت الداخلي والجزء الثابت الخارجي ويتم إنشاء قوة الجذب على قطب الدوار من الجزء الثابت الداخلي والخارجي. يمكن أيضاً تحسين أقطاب الجزء الثابت والدوار من المحرك المعاوي المفتاحي لتقليل القوة الشعاعية حيث تم تطوير محرك معاوي مفتاحي أحادي الطور عن طريق انحراف أقطاب الجزء الثابت والدوار في [68]، ويتم فحص الضوضاء والاهتزازات الصوتية ومقارنتها تحت زوايا انحراف مختلفة. من هذا العمل يمكن ملاحظة أن الانحراف المناسب يمكن أن يخفف بشكل فعال من الضوضاء والاهتزاز الصوتي للمحرك المعاوي المفتاحي وتُستخدم تقنية الانحراف أيضاً في مكانن المعاوفة المفتاحية الخطية [69].



الشكل 17. هيكل الثابت مع وبدون فواصل (أ- الثابت التقليدي ب- الثابت المتطور) [70].

ويتم فحص زاوية الانحراف المثلى باستخدام طريقة العناصر المحددة (Finite Element Method - FEM)، تم فحص تأثيرات الانحراف على كل من أقطاب الجزء الثابت والدوار لمحرك معاوي مفتاحي ثلاثي الطور ذو أقطاب 12/8 في

تردها الطبيعي في أشكال مختلفة [60]. يمكن أن تتحلل كثافة القوة الشعاعية التي تعمل على الهياكل المختلفة للماكينة إلى رتب توافقية محورية ومحيطية وزمنية مختلفة (ax, u, v) ، في بعض الحالات يتم اعتبار الوضع المحوري الأول فقط (ax) و تتحلل كثافة القوة إلى رتب توافقية (u, v) حيث يعتمد تردد التأثير لكل من هذه التوافقيات على الترتيب الزمني التوافقي والتردد الميكانيكي ويمكن حسابه على النحو التالي:

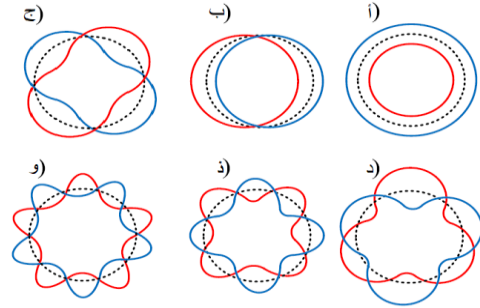
$$f_f(u) = |u|N_r f_{mech} = |u|N_r \frac{n}{60} [Hz] \quad (12)$$

f_f : هو تردد التأثير لقوة شعاعية متناسقة مع الترتيب الزمني

الكهربائي u ، f_{mech} هو التردد الميكانيكي الدوار، N_r

هو عدد أقطاب الدوار، n : سرعة الدوار (دورة في الدقيقة).

بشكل عام يتم نمذجة اهتزاز الجزء الثابت في مكانن المعاوفة المفتاحية ذات الفيض الشعاعي على أنه اهتزاز غلاف أسطواني مكافئ حيث يتم تحديد أوضاع اهتزاز الجزء الثابت للمحرك المعاوي المفتاحي في اتجاهات محيطية ومحورية، يوضح الشكل 16 أمثلة لأشكال مختلفة من الوضع المحيطي لقشرة أسطوانية كل من هذه الأوضاع لها تردد طبيعي اعتماداً على أبعاد الهيكل وخصائص المواد، مثل معامل يونغ (Young's modulus) ونسبة بويسون (Poisson's ratio)، تثير توافقيات كثافة القوة الشعاعية تركيب الجزء الثابت، وتحدث الضوضاء الصوتية عندما يصبح تردد الإيجار لترتيب توافقي مكاني معين قريباً من التردد الطبيعي لشكل الوضع المحيطي المقابل.



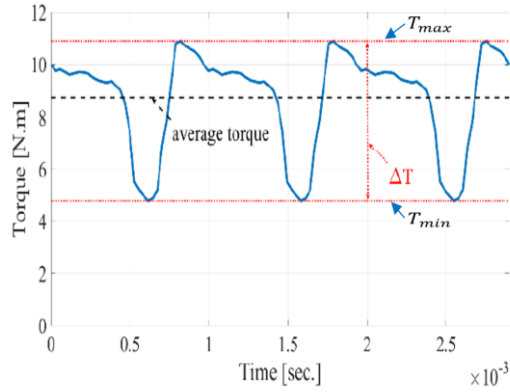
الشكل 16. أوضاع الاهتزاز المحيطي للجزء الثابت لمحرك المعاوفة المفتاحية ذات الفيض الشعاعي (أ- الوضع 0، ب- الوضع 1، ج- الوضع 2، د- الوضع 3، ذ- الوضع 4، و- الوضع 5) [30].

5.1.1 تطورات طوبولوجيا المحرك المعاوي المفتاحي

لتقليل القوة الشعاعية SRM Topology Developments for Radial Force Reduction

يمكن تخفيف الضوضاء الصوتية عن طريق تحسين استراتيجيات الهندسة والتحكم. تم تحليل تأثير العوامل الهندسية المختلفة وعدد أقطاب الجزء الثابت / الدوار في [56]. يمكن تقليل الضوضاء الصوتية عن طريق الاختيار الصحيح للنسبة بين سمك هيكل الجزء الثابت وعرض القطب الجانبي للجزء الثابت والنسبة بين ارتفاعات الجزء الدوار والجزء الثابت وشكل قطب الجزء الثابت [61]، وشكل الجزء الدوار الخارجي

الطبيعي والنسبي، ΔT_{rms} هو جذر متوسط التربيع لتموج العزم. يوضح الشكل 20 متوسط عزم الدوران وتموج عزم الدوران من الذروة إلى الذروة في شكل موجة عزم الدوران النموذجي لمحرك معاوقي مفتاحي ذو فيض شعاعي ذو أقطاب 6/14 على دورة كهربائية واحدة تعمل عند سرعة 1500 دورة في الدقيقة.



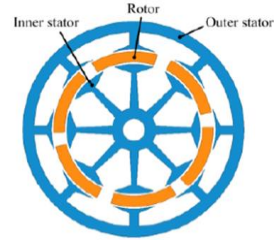
الشكل 20. شكل موجة عزم الدوران النموذجي على دورة كهربائية واحدة لمحرك معاوقي مفتاحي ذو أقطاب 6/14 بسرعة 1500 دورة في الدقيقة [30].

تموج عزم الدوران من الذروة إلى الذروة، وتموج عزم الدوران الطبيعي ونسبة تموج عزم الدوران كما هو موضح في المعادلات 13، 14، 15 على التوالي بسيطة، ولكن فقط القيم القصوى والذنب لعزم الدوران تتطلب استخدام شكل الموجة لحساب تموج عزم الدوران، ومع ذلك فإن تعبير جذر متوسط تربيع تموج عزم الدوران (Root Mean Square - RMS) الموضح في المعادلة 16 هو دالة لجميع نقاط بيانات شكل موجة عزم الدوران ويقاس انحراف هذه النقاط عن متوسط خط عزم الدوران وغالباً ما تستخدم صيغة جذر متوسط التربيع لتموج عزم الدوران (RMS) لتحسين تقليل تموج عزم دوران المحرك المعاوقي المفتاحي وتحسين جودة عزم دوران الماكينة [19]. يعد تحسين الهندسة والطوبولوجيا نهجين شائعين لتقليل تموج عزم دوران الماكينة، تم استخدام زوايا القوس لأقطاب الجزء الدوار والجزء الثابت وارتفاع أقطاب الجزء الدوار والجزء الثابت وسمك الحديد الخلفي للجزء الثابت / الدوار وعدد الاطوار وطول المكسد لتقليل تموج عزم دوران الماكينة، أيضاً تم تحسين توزيع المواد داخل القلب الدوار والجزء الثابت لتقليل تموج عزم الدوران [72], [73].

5.2.1 تقنيات تقليل تموج العزم Torque Ripple Reduction Techniques

في محركات المعاوقة المفتاحية سيؤدي تموج عزم الدوران العالي أيضاً إلى ضوضاء صوتية مما سيؤثر على أداء التحكم في نظام التحكم المغلق. في [74] يتم تقديم ملخص لتركيبات المحرك المعروفة مع العدد المقبول من أقطاب الجزء الثابت والدوار على النحو التالي محرك معاوقي مفتاحي ثلاثي الطور: 6/2، 6/4، 6/8، 6/14، 12/8، 18/12، و 24/16. محرك معاوقي مفتاحي رباعي الطور 8/6، 8/10، 16/12، 24/18، و 32/24. محرك معاوقي مفتاحي خماسي الطور 10/4، 10/6، 10/8، و 10/12. محرك معاوقي مفتاحي سداسي الطور 12/10، 12/14، و 24/20. محرك معاوقي مفتاحي سباعي الطور 14/10، 14/12، و 16/14. تقليدياً تكون زاوية القوس

[71]، وتم توضيح هيكل المحرك في الشكل 19، يتم تقديم تقنيات مختلفة للانحراف وتتم مقارنة القوة الشعاعية وعزم الدوران والكفاءة بالتفصيل. من النتائج يمكن استنتاج أن انحراف قطب الجزء الثابت هو طريقة أكثر فعالية لتقليل اهتزاز المحرك المعاوقي المفتاحي من انحراف قطب الدوار.



الشكل 18. هيكل المحرك المعاوقي المفتاحي ذو الثابت المزدوج [30].



الشكل 19. هيكل محرك منحرف (أ- انحراف الثابت ب- انحراف الدوار) [30].

5.2 Torque Ripple العزم

تتميز محركات المعاوقة المفتاحية بتموج عزم دوران أكبر من أنواع الماكينات الأخرى بسبب عزم الدوران غير الخطي المنفصل لكل طور والهيكل البارز المزدوج للماكينة، هناك تعريفات مختلفة لتموج عزم الدوران المستخدم في المراجع العلمية كوظائف موضوعية منها:

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (13)$$

$$TR_n = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} \quad (14)$$

$$TR_p = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} \times 100\% \quad (15)$$

$$\Delta T_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_{av})^2 dt} \quad (16)$$

T_{max} و T_{min} هما أعظم وأقل قيمة للعزم خلال دورة كهربائية واحدة، T_{av} هو متوسط عزم الدوران، $T(t)$ هو العزم الأنفي كدالة للزمن، $t_2 - t_1$ تمثل الفترة الزمنية لإكمال دورة كهربائية واحدة، ΔT هو تموج عزم الدوران من الذروة إلى الذروة، TR_n و TR_p هو تموج عزم الدوران

عزم الدوران غير الخطية المنفصلة، يحدد منحني خاصية وضعية موقع الدوار للمحرك المعاوي المفتاحي ووضع التيار لأطوار الجزء الثابت الفردي تموج عزم الدوران في التشغيل الديناميكي.

5.4 متوسط عزم الدوران وكثافة العزم and Torque density

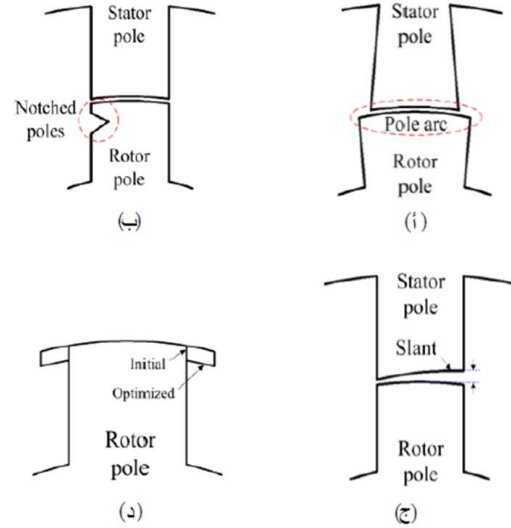
تتمتع المحركات التزامنية ذات المغناطيس الدائم (PMSMs) بأعلى كثافة عزم دوران بين أنواع الماكائن الأخرى بسبب إثارة المغناطيس الدائم. بالنسبة إلى مكائن المعاوية المفتاحية (SRMs) يمكن تحسين متوسط عزم الدوران وكثافة عزم الدوران من خلال اختيار المواد الأساسية للجزء الدوار والجزء الثابت وتحسين هيكل الماكينة من خلال التصميم الهندسي أو تحسين الهيكل [80]. عادةً ما يتم استخدام حديد الكوبالت و 6.5% حديد السليكون في مكائن المعاوية المفتاحية لزيادة كثافة عزم الدوران نظراً لارتفاع حد التشبع الذي يعزز التحمل المغناطيسي للماكينة [81], [80]. يوضح الشكل 20 متوسط عزم الدوران (الخط المنقط الأسود) لعزم دوران محرك معاوي مفتاحي ذو أقطاب 6/14 يعمل بسرعة 1500 دورة في الدقيقة. يمكن حساب متوسط عزم الدوران باستخدام المعادلة التالية على دورة كهربائية كاملة واحدة:

$$T_{av} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} T(t) dt \quad (17)$$

تُعرف كثافة عزم الدوران (N.m / L) للمحرك على أنها متوسط عزم دوران المحرك إلى حجم المحرك. أيضاً، يمكن استخدام عزم الدوران المحدد (N.m / kg) كوظيفة تحسين وهي النسبة بين متوسط عزم الدوران ووزن المحرك. تم تطبيق تحسينات الهندسة والطوبولوجيا للمحرك المعاوي المفتاحي على مدى واسع في البحوث لتعزيز متوسط عزم الدوران وكثافة عزم الدوران، حيث ان كثافة عزم الدوران مطلب مهم في المركبات الكهربائية [83], [82], [28]. ظهرت محركات المعاوية المفتاحية التي لها قيم كثافة عزم تنافسية لتطبيقات المركبات الكهربائية خلال السنوات الأخيرة [84]. يمكن تحسين كثافة عزم الدوران من خلال تحسين الهيكل الميكانيكي وتوزيع لفات الجزء الثابت في محركات المعاوية المفتاحية. يمكن تحقيق تحسين الشكل الهندسي عن طريق ضبط الأبعاد المادية مثل أقطاب القطب الثابت / الدوار وقطر الجزء الدوار وطول المكسد (Stack) [85]. تم اقتراح بعض الأنواع الخاصة من الأشكال الهندسية مثل مجموعة خماسية (quintuple-set) لمحركات المعاوية المغناطيسية [86]، ذو هيكل دوار قطعي ومحرك معاوي مفتاحي ذو فتحة دائرية مجزأة (Circular Slot Segmented Switched Reluctance Motor - CSSSRM) [87] ومحرك معاوي مفتاحي ذو فيض محوري مع قلب حديدي ذو شكل حرف (C) ملفوفة بشكل منفصل [88].

تم اقتراح تركيب محرك معاوي مفتاحي جديد مع أقطاب دوار أكثر من أقطاب الجزء الثابت لزيادة متوسط عزم الدوران في [74]. يمكن أن يؤدي عرض عمود الدوران وعمل الانحراف إلى تعزيز متوسط عزم الدوران لمحركات المعاوية المفتاحية [89]. تؤثر استراتيجيات التصميم في اللف أيضاً على كثافة عزم الدوران في المحرك المعالي المفتاحي. تم اقتراح محرك معاوي مفتاحي جديد مع ملفات مجزأة مع التيارات ثنائية القطب في [90]. يمكن لمحركات المعاوية المفتاحية التي تستخدم ملفات تيار مستمر مساعدة لتحقيق الإثارة المضمنة في هياكل المعاوية المفتاحية أن تحسن بشكل كبير من كثافة عزم

لقطب الجزء الدوار أكبر قليلاً من زاوية القوس لقطب الجزء الثابت في المحرك المعالي المفتاحي. تركز بعض الاستراتيجيات الأخرى على تطويع أشكال القطب الثابت والقطب الدوار لتقليل تموج عزم الدوران كما هو موضح في الشكل 21.



الشكل 21. تحسين قطب المحرك (أ- قوس القطب ب- شق قطب الدوار ج- مائل قطب الثابت د- حذاء قطب الدوار) [70].

يتم الحصول على أفراس الجزء الثابت والقطب الدوار المحسنة (انظر الشكل 21 (أ)) لمحرك معاوي مفتاحي ذو أقطاب 8/6 من خلال تحليل طريقة العناصر المحددة (FEM)، حيث يتم تحسين متوسط عزم الدوران وتقليل تموج عزم الدوران [75]. تم فحص هندسة محركات المعاوية المفتاحية لتموج عزم الدوران المنخفض في [76]، وتم اقتراح محرك به أقطاب محززة (انظر الشكل 21 (ب)) من خلال تحليل طريقة العناصر المحددة (FEM) مقارنة بهيكل المحرك التقليدي. في [77] يتم تقديم محرك معاوي مفتاحي له أشكال وجه قطب مائل (انظر الشكل 21 (ج)) حيث تم تصميم الميل في القطب الثابت من خلال حالتين. في الحالة الأولى، تقل الفجوة الهوائية عندما يقترب قطب الدوار من موضع المحاذاة بالكامل، في الحالة الثانية تزداد الفجوة الهوائية عندما يتداخل أقطاب الجزء الثابت والجزء الدوار. في [78] يتم تقديم حذاء قطب متصل بالوجه الجانبي لقطب الجزء الدوار كما هو موضح في الشكل 21 (د) حيث يتم تحسين متوسط عزم الدوران وتقليل تموج عزم الدوران غير المرغوب فيه. في [79] تم تحسين ارتفاع قطب الجزء الثابت وزاوية استدقاق الجزء الثابت وقوس عمود الدوران وشكل حذاء القطب في محرك معاوي ثلاثي الطور ذو أقطاب 24/16 لتقليل تموج عزم الدوران وتحسين قدرة عزم الدوران لتطبيقات الجر.

5.3 ملخص ومقارنة تقنيات تقليل الاهتزاز الشعاعي وتموج العزم Summary and comparison of radial vibration and ripple torque reduction techniques

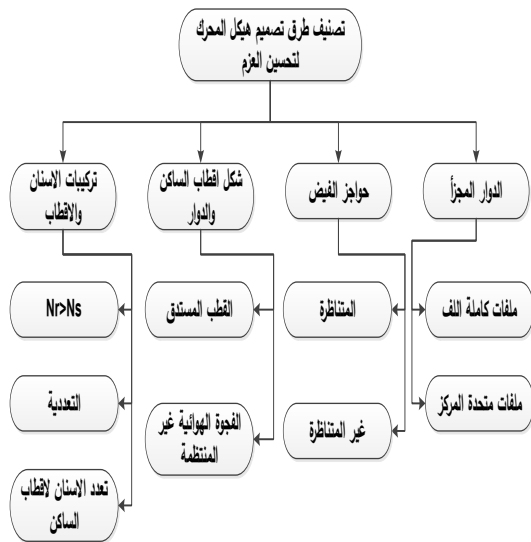
المقارنة بين تقنيات تقليل الاهتزاز الشعاعي وتقنيات تقليل تموج عزم الدوران موضحة في الجدول 1. تموج عزم الدوران في مكائن المعاوية المفتاحية أعلى نسبياً منه في المكائن الجيبية ثلاثية الطور بسبب الهياكل البارزة بشكل مضاعف وآلية إنتاج

جدول 1. ملخص ومقارنة لتقنيات تقليل تموج عزم الدوران وتخفيف الاهتزاز الشعاعي [70].

المراجع	السلبيات	الإيجابيات	التقنية المعتمدة	الطريقة
[108][74]	تركيب الدوار المعقد، زيادة مواد الدوار	زيادة متوسط عزم الدوران، تقليل تموج العزم في الشروط غير المشبعة، تقليل الخسائر النحاسية	تصميم الدوار بعدد أقطاب أكبر	عدد أكبر من أقطاب الدوار
[109][75]	التحسين المعقد للحسابات	تموج عزم الدوران المنخفض، زيادة الكفاءة، أداء تشغيل عالي السرعة	تعديل الأشكال الدوارة المرغوبة بما في ذلك قوس القطب، وحذاء القطب، والفجوة الهوائية غير المنتظمة	تصميم شكل القطب
[64]	تركيب معقد وصعب	انخفاض الاهتزاز الشعاعي، انخفاض الخسائر بفعل الهواء، بنية قوية، تعديلات صغيرة في تصحيح الجزء الثابت	استبدال أسافين الشق بفواصل الجزء الثابت slot wedges الهيكلية	ادراج فواصل الثابت
[62]	يتسبب الضلع الرقيق في حدوث تشوه عند سرعة دوران عالية	انخفاض الاهتزاز الشعاعي، انخفاض الخسائر بفعل الهواء، تحسين كفاءة	قم بتوصيل أعمدة الدوار البارزة بأضلاع رقيقة	الدوار الاسطواني
[67][66]	تكلفة عالية للنموذج الأولي للمحرك، وهيكلي محرك معقد	انخفاض الاهتزاز الشعاعي، وكثافة قدرة عالية	قم بتجميع الجزء المتحرك بين الجزء الثابت الداخلي والجزء الثابت الخارجي	محرك معاوحي مفتاحي ذو ساكن مزدوج
[71][68]	تصنيع معقد بأحجام مختلفة بين لوحين	اهتزاز شعاعي منخفض، يتم التحكم فيه بواسطة مخططات تقليدية	قم بإزالة أقطاب الجزء الثابت والدوار بزوايا مناسبة	أقطاب منحرفة

السري يتم من - - - - -
[91], [92]. بالنظر إلى هندسة الماكينة التقليدية يمكن تحسين الأبعاد المختلفة مثل زوايا قوس القطب وارتفاع العمود لزيادة عزم الدوران [93], [30]. تشمل الجوانب المختلفة للبنية المغناطيسية التي تم أخذها في الاعتبار هنا زيادة التعددية (أي عدد أزواج القطب لكل طور)، وإدخال الأسنان في أقطاب الجزء الثابت، واستدقاق أعمدة الجزء الثابت، والفجوة الهوائية غير المنتظمة، وإدخال حواجز الفيض في مسار الفيض والدوار الجزأ. ويمكن تصنيف الجوانب المختلفة للهيكلي المغناطيسي كما هو موضح في الشكل 22.

يوضح الجدول 2 ملخص إيجابيات وسلبيات بعض التقنيات القائمة على تحسين الهيكل المغناطيسي لتعزيز عزم الدوران للمحرك المعاوحي المفتاحي.



الشكل 22. تصنيف الأساليب القائمة على الهيكل المغناطيسي لتعزيز عزم الدوران [54].

كفاءة مكائن المعاوقة المفتاحية كما هو موضح في المعادلة التالية:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{elec}} = \frac{P_{mech}}{P_{mech} + P_{cu} + P_{core} + P_{win} + P_{other}} \quad (18)$$

η هي كفاءة المحرك المعاوق المفتاحي، P_{mech} هي القدرة الميكانيكية الخارجة، P_{elec} هي القدرة الكهربائية الداخلة، P_{other} هي الخسائر الأخرى التي لا تتعلق بالتصميم

5.5 تحسين الكفاءة Efficiency Improvement

يشجع استخدام كفاءة المحرك المعاوق المفتاحي كوظيفة موضوعية في البحوث لتحسين أداء الماكينة، تعتبر خسائر القلب الحديدي (P_{core}) والفقد بفعل الهواء (P_{win}) وخسائر النحاس (P_{cu}) والخسائر الناتجة عن مسوقات الكترونيايات القدرة هي مصادر الخسائر في المحرك المعاوق المفتاحي. تتأثر خسائر القلب الحديدي بشكل كبير بخصائص مادة الجزء الثابت / الدوار، يمكن أن يؤدي تقليل هذه الخسائر إلى تحسين

جدول 2. ملخص مراجعة الهياكل المغناطيسية لتعزيز عزم الدوران في المحرك المعاوق المفتاحي [70].

طريقة تحسين العزم	الإيجابيات	السلبيات
اقطاب دوار أكبر من اقطاب الثابت $N_r > N_s$	<ul style="list-style-type: none"> يزيد من مساحة اللف المتاحة يزيد من كثافة عزم الدوران عند كثافات التيار المنخفضة 	<ul style="list-style-type: none"> غير مفضل للتطبيقات ذات كثافة تيار عالية
مضاعفة اقطاب الثابت والدوار	<ul style="list-style-type: none"> يقلل من الحديد الخلفي (back iron) يزيد من مساحة اللف يعزز كثافة عزم الدوران عند كثافة التيار العالية 	<ul style="list-style-type: none"> غير مفضل للتطبيقات ذات كثافة تيار عالية
تعدد الأسنان	<ul style="list-style-type: none"> يزيد من عدد تحويلات الطاقة لكل دورة يعزز كثافة عزم الدوران عند كثافات التيار المنخفضة 	<ul style="list-style-type: none"> غير مناسب لتطبيقات السرعة المتوسطة والعالية وكثافة التيار العالية
القطب المستدق (Pole tapering)	<ul style="list-style-type: none"> يزيد من مساحة المسار المغلق $\phi - i$ وبالتالي متوسط عزم الدوران يشكل ملف عزم الدوران للطور الواحد 	<ul style="list-style-type: none"> يقلل من مساحة اللف المتاحة يزيد من القصور الذاتي للدوار
الفجوة الهوائية غير المنتظمة	<ul style="list-style-type: none"> يزيد من مساحة المسار المغلق $\phi - i$ وبالتالي متوسط عزم الدوران يقلل تموج العزم 	<ul style="list-style-type: none"> مناسب تمامًا للتطبيقات أحادية الاتجاه فقط يتطلب تحسينًا شاملاً
حواجز الفيض (Flux barriers)	<ul style="list-style-type: none"> يزيد من مساحة المسار المغلق $\phi - i$ لتشغيل النبضة الواحدة يقلل تموج العزم 	<ul style="list-style-type: none"> يقلل عزم الدوران الناتج في عملية التحكم بالتيار يتطلب تحسينًا مكثفًا لأشكال حواجز الفيض وعددها وسمكها
الدوار المجزأ مع لفائف كاملة الخطوة	<ul style="list-style-type: none"> مسارات فيض أقصر واستخدام مغناطيسي أعلى يزيد من عزم الدوران في مناطق كثافة التيار العالية والمنخفضة 	<ul style="list-style-type: none"> يمكن أن تؤدي اللفات الطرفية الكبيرة في حالة انخفاض عدد الأقطاب والمكانن ذات القطر الأكبر إلى خسائر أعلى في النحاس

7. الاستنتاجات

حظيت المركبات الكهربائية والمركبات الكهربية الهجينة باهتمام متزايد لتقليل استهلاك الطاقة الأحفورية وانبعثات ثاني أكسيد الكربون الناتج عن المركبات التقليدية. تكتسب محركات المعاوقة المفتاحية اهتماماً كبيراً بالمركبات الكهربية والمركبات الكهربية الهجينة نظراً للهيكل البسيط والقوي والموثوقية العالية والميزة الخالية من معادن الأرض النادرة. يتم تقديم استعراض موجز لاتجاهات البحث عن المحرك المعاوق المفتاحي في هذه الورقة حيث ان الجزء الدوار مكون من صفائح فقط ولفائف الجزء الثابت هو من النوع الموزع الذي يمكن إدخاله بسهولة في القطب الثابت، حيث تبدأ الورقة بمناقشة موجزة حول التركيبات المختلفة للمركبات الكهربية وتركز على الأنواع المختلفة لمكانن المعاوقة المفتاحية حيث تم تصنيفها اعتماداً على حركة الدوران واتجاه الفيض، حيث تتم مراجعة الأنواع الشعاعية والمحورية والدوارة والخطية وغيرها. ثم تستعرض الورقة التحسين الهندسي لمكانن المعاوقة المفتاحية لتحسين الوظائف الموضوعية من تقليل القوة الشعاعية وتقليل توج العزم وتحسين العزم وتحسين الكفاءة، حيث تم استعراض التقنيات المستخدمة لتحسين الهيكل الخاص بالمحرك المعاوق المفتاحي من تغيير عدد اقطاب الساكن والدوار من ناحية العدد والشكل وتغيير شكل لفائف الساكن وتغيير عدد الاطوار وحجم الفجوة الهوائية بما يضمن الحصول على افضل النتائج الممكنة للتحسين مع توضيح الايجابيات والسلبيات لكل تقنية مستخدمة , وتوضح الورقة البحثية أهمية تقنيات التحسين متعدد الأهداف وتفضيلها على تقنيات التحسين أحادية الهدف.

الكهرومغناطيسي مثل خسارة احتكاك المحمل. يتم تضمين الخسارة بفعل الهواء (P_{win}) في الجزء الدوار كعامل معتمد كهرومغناطيسي في هذه المعادلة لأنه يعتمد على تصميم الجزء الدوار بسبب الطبيعة البارزة لهيكل الجزء الدوار. يمكن أن يؤدي اختيار مادة الماكنة إلى تحسين كفاءة الماكنة، عادةً ما تُستخدم الأسلاك المغناطيسية النحاسية للملفات بسبب الموصلية الحرارية العالية والقدرة على تحمل التيار العالي والمقاومة الكهربائية المنخفضة مقارنةً بنظيراتها من الألومنيوم [18]. يمكن تقليل فقد القلب الحديدي باستخدام فولاذ مغناطيسي منخفض الفقد، مثل الفولاذ السليكوني العالي بنسبة 6.5%، وفولاذ السيليكون منخفض الفقد وسبائك غير متبلورة مصفحة ومركبات مغناطيسية ناعمة ذات مقاومة نوعية عالية [81]، [94]، ويعتبر التصميم الهندسي هو نهج بديل لتحسين كفاءة المحرك المعاوق المفتاحي، يعرض [95] الإجراءات التفصيلية لتحديد عوامل الماكنة مثل قطر تجويف الجزء الثابت وقوس القطب الثابت / الدوار وسماكة هيكل الجزء الثابت وعمق فتحة الجزء الدوار لمحرك معاوق مفتاحي خماسي الطور. في [57] تم تحسين متغيرات التصميم مثل طول المكند ودوران اللف وعرض فجوة الهواء باستخدام نموذج سطح الاستجابة (response surface model) ونموذج كريغنج (kriging model). يُقترح في [58] نوع من المحرك المعاوق المفتاحي مع دوار منحرف متدرج (Stepped Skewing Rotor SSR) بزواوية انحراف محددة.

6. التصميم والتحسين متعدد الأهداف لمحركات المعاوقة

المفتاحية Design and Multiobjective Optimization of SRM

تتمثل المشكلة في التحسين أحادي الهدف في التخفيض غير المتلائم المحتمل لمؤشرات الأداء المهمة الأخرى، مثل المقايضات لبعض التحسينات التي بدأت على هدف واحد لذلك فإن تنفيذ التحسين متعدد الأهداف على محركات المعاوقة المفتاحية ضروري لتلبية احتياجات التطبيقات المختلفة [27]، [98]–[96] تستخدم غالبية البحوث خوارزميات عشوائية معينة لإجراء البحث الأمثل عن التصميم [99]، من خلال تقييم عدد كبير من المرشحين للتصميم بناءً على العديد من متغيرات التصميم الأولية المستقلة التي تم إنشاؤها عشوائياً، تتضمن هذه المتغيرات عادةً بعض العوامل الهندسية للمحرك المعاوق المفتاحي الحاسمة، بما في ذلك قطر الفجوة الهوائية وطول المكند وارتفاع قطب الجزء الثابت / الدوار وزوايا قوس القطب، فضلاً عن الكميات غير الهندسية الأخرى مثل كثافة التيار وعدد الدورات. من ثم تم تصميم المحرك المعاوق المفتاحي الكامل وتقييم مؤشرات الأداء المختلفة إما عن طريق محاكاة تحليل العناصر المحددة (Finite Element Analysis - FEA) [102]–[100]، [27]، نماذج بديلة مثل كريغنج [103]، أو نماذج تحليلية على أساس الدائرة المكافئة المغناطيسية [104]، أو معادلات ماكسويل [105]. بعد تقييم جميع مؤشرات الأداء في دالة موضوعية قياسية أو متجهية يتم إنشاء متغيرات التصميم الأولى من الجيل التالي بواسطة [101]، (Multiobjective genetic algorithm - MOGA) [106]، تحسين سرب الجسيمات (Particle Swarm Optimization - PSO) [104]، [100]، [97]، والتطورات التفاضلية (Differential Equation - DE) [107]، [102]، تتكرر العملية بأكملها حتى نهاية التكرارات. ورد في [101] - [114] أنه يمكن إجراء تحسين كبير على واحد أو اثنين من مؤشرات الأداء المستهدفة مع تأثير ضئيل للعوامل الأخرى كما موضح في الجدول 3.

جدول 3. مقارنة بين مختلف الأساليب متعددة الأهداف والتصميم الأمثل لمكانن المعاوقة المفتاحية [97].

المراجع	طريقة التمثيل	طريقة التحسين	متوسط العزم	كثافة العزم	الكفاءة	تموج العزم	الضوضاء الصوتية	القوة الشعاعية
[27]	FEA	Enumeration	نعم	نعم	جزئياً	لا	لا	لا
[96]	FEA	Enumeration	نعم	لا	نعم	نعم	لا	لا
[97]	FEA	RS	نعم	لا	لا	نعم	لا	لا
[98]	FEA	N/A	نعم	نعم	جزئياً	نعم	لا	لا
[110]	FEA	GA	نعم	لا	لا	نعم	لا	لا
[111]	FEA	GA	نعم	نعم	لا	نعم	لا	لا
[107]	FEA	DE	نعم	نعم	نعم	لا	لا	لا
[100]	FEA	PSO	نعم	نعم	نعم	نعم	لا	لا
[103]	Surrogate model	PSO	نعم	لا	لا	نعم	لا	لا
[104]	MEC	PSO	نعم	لا	نعم	لا	لا	لا
[106]	Fuzzy system	GA	لا	لا	نعم	نعم	لا	لا
[105]	Maxwell's equations	PSO	نعم	نعم	نعم	لا	لا	لا
[101]	FEA	GA	نعم	لا	نعم	لا	لا	لا
[102]	FEA	DE	لا	لا	لا	نعم	نعم	لا

- المصادر:
- “An adaptive ECMS with driving style recognition for energy optimization of parallel hybrid electric buses,” *Energy*, vol. 189, p. 116151, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116151.
- [12] Z. Jin, X. Sun, G. Lei, Y. Guo, and J. Zhu, “Sliding Mode Direct Torque Control of SPMSMs Based on a Hybrid Wolf Optimization Algorithm,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 5, pp. 4534–4544, 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3080220.
- [13] X. An, G. Liu, Q. Chen, W. Zhao, and X. Song, “Robust Predictive Current Control for Fault-Tolerant Operation of Five-Phase PM Motors Based on Online Stator Inductance Identification,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 11, pp. 13162–13175, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3077235.
- [14] Q. Chen, W. Zhao, G. Liu, and Z. Lin, “Extension of Virtual-Signal-Injection-Based MTPA Control for Five-Phase IPMSM Into Fault-Tolerant Operation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 944–955, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2826473.
- [15] X. Sun, Y. Zhang, G. Lei, Y. Guo, and J. Zhu, “An Improved Deadbeat Predictive Stator Flux Control With Reduced-Order Disturbance Observer for In-Wheel PMSMs,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 27, no. 2, pp. 690–700, 2022.
- [16] N. Zabihi and R. Gouws, “A review on switched reluctance machines for electric vehicles,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2016, pp. 799–804. doi: 10.1109/ISIE.2016.7744992.
- [17] B. Bilgin, A. Emadi, S. Member, and M. Krishnamurthy, “Comprehensive Evaluation of the Dynamic Performance of a 6 / 10 SRM for Traction Application in PHEVs,” vol. 60, no. 7, pp. 2564–2575, 2013.
- [18] P. Wach, *Dynamics and control of electrical drives*, 2011th ed. Berlin, Germany: Springer, 2014.
- [19] Vandana R.; and B. G. Fernandes, “Design Methodology for High-Performance Segmented Rotor Switched Reluctance Motors,” vol. 30, no. 1, pp. 11–21, 2015.
- [20] H. Torkaman, N. Faraji, and M. S. Toulabi, “Influence of rotor structure on fault diagnosis indices in two-phase switched reluctance motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 3, pp. 136–143, 2014, doi: 10.1109/TMAG.2013.2285882.
- [21] M. Asgar, E. Afjei, and H. Torkaman, “A New Strategy to Design and Analysis of a Double-Stator Switched Reluctance Motor: Electromagnetics, FEM and Experiment,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 12, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2465307.
- [22] C. Grosjean, P. Herrera Miranda, M. Perrin, and P. Poggi, “Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry,”
- [1] R. Li, Sufei; Zhang, Shen; Habetler, Thomas; Harley, “Modeling, Design Optimization and Applications of Switched Reluctance Machines - A Review. *IEEE Transactions on Industry Applications*,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 3, pp. 2660–2681, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2897965.
- [2] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekara, “Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2237–2245, 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.922768.
- [3] X. Tian, R. He, X. Sun, Y. Cai, and Y. Xu, “An ANFIS-Based ECMS for Energy Optimization of Parallel Hybrid Electric Bus,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 2, pp. 1473–1483, 2020, doi: 10.1109/TVT.2019.2960593.
- [4] X. Sun, Z. Shi, and J. Zhu, “Multiobjective Design Optimization of an IPMSM for EVs Based on Fuzzy Method and Sequential Taguchi Method,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 11, pp. 10592–10600, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3031534.
- [5] H. Wang, Y. Yu, Y. Cai, X. Chen, L. Chen, and Q. Liu, “A Comparative Study of State-of-the-Art Deep Learning Algorithms for Vehicle Detection,” *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 11, no. 2, pp. 82–95, 2019, doi: 10.1109/MITS.2019.2903518.
- [6] J. Huang, G. Chen, L. Shu, S. Wang, and Y. Zhang, “An Experimental Study of Clogging Fault Diagnosis in Heat Exchangers Based on Vibration Signals,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1800–1809, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2555902.
- [7] Z. Shi *et al.*, “Torque Analysis and Dynamic Performance Improvement of a PMSM for EVs by Skew Angle Optimization,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/TASC.2018.2882419.
- [8] Najem, Wisam M., Omar Sharaf Al-Deen Al-Yozbaky, and Shaker Mahmood Khudher, “Effect of Electric Vehicle Charging Stations on the Performance of Distance Relay,” *(AREJ), AL-Rafidain Eng. J.*, vol. 28, no. 1, pp. 133–144, 2023.
- [9] J. R. Riba, C. López-Torres, L. Romeral, and A. Garcia, “Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 367–379, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.121.
- [10] X. Sun, J. Cao, G. Lei, Y. Guo, and J. Zhu, “A Robust Deadbeat Predictive Controller with Delay Compensation Based on Composite Sliding-Mode Observer for PMSMs,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 9, pp. 10742–10752, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3063226.
- [11] X. Tian, Y. Cai, X. Sun, Z. Zhu, and Y. Xu,

- 858, 2014, doi: 10.6113/JPE.2014.14.5.852.
- [34] H. Torkaman, A. Ghaheri, and A. Keyhani, "Axial flux switched reluctance machines: A comprehensive review of design and topologies," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 3, pp. 310–321, 2019, doi: 10.1049/iet-epa.2018.5190.
- [35] W. Bo and D. Lee, "A Novel Axial Field SRM with Segmental Rotor: Concept, Design and Analysis," in *2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*. IEEE, 2013.
- [36] D. W. J. Pulle and I. R. Petersent, "unified approach to switched reluctance drive modeling: application," in *PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (Cat. No. 98CH36196)*. Vol. 2. IEEE, 1998, pp. 1681–1686.
- [37] Shibamoto T.; Nakamura K.; Goto H.; and Ichinokura O., "A Design of of Axial-gap a Formatted Switched Technical Reluctance Work for Motor for In-Wheel the ICEM," in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012, pp. 1160–1165.
- [38] R. Madhavan, S. Member, and B. G. Fernandes, "A Novel Axial Flux Segmented SRM for Electric Vehicle Application," in *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010*. IEEE, 2010, pp. 0–5.
- [39] R. Madhavan and B. G. Fernandes, "Comparative Analysis of Axial Flux SRM Topologies for Electric Vehicle Application," in *2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. IEEE, 2012.
- [40] Ma; Jimin; Ronghai Qu; and Jian Li., "Optimal design of axial flux switched reluctance motor for electric vehicle application," in *17th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2014*, 2014, pp. 1860–1865. doi: 10.1109/ICEMS.2014.7013786.
- [41] H. Goto, S. Murakami, and O. Ichinokura, "Design to maximize torque-volume density of axial-flux SRM for in-wheel EV," in *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015, pp. 5191–5196. doi: 10.1109/IECON.2015.7392915.
- [42] M. Sengupta, S. S. Ahmad, and D. Mukherjee, "Experimental investigations on a novel laboratory prototype of axial flux switched reluctance motor," in *PEDES 2012 - IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, 2012. doi: 10.1109/PEDES.2012.6484422.
- [43] B. S. Lee, H. K. Bae, P. Vijayraghavan, and R. Krishnan, "Design of a linear switched reluctance machine," *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)*, vol. 4, no. 1, pp. 2267–2274, 1999, doi: 10.1109/ias.1999.799160.
- [23] D. B. Richardson, "Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 247–254, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.042.
- [24] A. Poullikkas, "Sustainable options for electric vehicle technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1277–1287, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.016.
- [25] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 82–102, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.077.
- [26] T. H. Bradley and A. A. Frank, "Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 1, pp. 115–128, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.05.003.
- [27] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, S. Member, T. W. Ng, N. C. Cheung, and S. Member, "Multi-Objective Optimization Design of In-Wheel Switched Reluctance Motors in Electric Vehicles," vol. 57, no. 9, pp. 2980–2987, 2010.
- [28] B. Bilgin *et al.*, "Making the Case for Switched Reluctance Motors for Propulsion Applications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 7, pp. 7172–7186, 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2993725.
- [29] R. Vandana, S. Nikam, and B. G. Fernandes, "Criteria for design of high performance switched reluctance motor," in *2012 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM*, 2012, pp. 129–135. doi: 10.1109/ICEIMach.2012.6349853.
- [30] M. Abdalmagid, E. Sayed, M. H. Bakr, and A. Emadi, "Geometry and Topology Optimization of Switched Reluctance Machines: A Review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 5141–5170, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3140440.
- [31] W. Wang, T. Lv, and H. Gao, "Robust Beamforming and Power Allocation for Secrecy in DF Relay Networks with Imperfect Channel State Information," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 9520–9527, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2649568.
- [32] Hwang Hongsik; Jin Hur and Cheewoo Lee., "Novel Permanent-Magnet-Assisted Switched Reluctance Motor (I): Concept, Design, and Analysis," in *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE, 2013, pp. 602–608.
- [33] B. Wang, D. H. Lee, C. W. Lee, and J. W. Ahn, "Characteristics analysis of a novel segmental rotor axial field switched reluctance motor with single teeth winding," *J. Power Electron.*, vol. 14, no. 5, pp. 852–

- 10.1109/TEC.2013.2291702.
- [56] M. N. Anwar and I. Husain, "Radial force calculation and acoustic noise prediction in switched reluctance machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 6, pp. 1589–1597, 2000, doi: 10.1109/28.887210.
- [57] M. Elamin, "Acoustic Noise Mitigation of Switched Reluctance Machines Through Skewing Methods," M.S. thesis, Univ. Akron, OH, USA, 2017.
- [58] O. Gundogmus, L. Vadamodala, Y. Sezer, J. Kutz, J. Tylanda, and R. L. Wright, "Simultaneous torque and radial force ripple mitigation in dq controlled switched reluctance machines," in *2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC*, 2019, pp. 260–265. doi: 10.1109/IEMDC.2019.8785104.
- [59] O. Sharaf AL-Deen Yehya, "Parasitic Torques of single phase induction motors and its effect on the generated noise and vibration," *AL-Rafdain Eng. J.*, vol. 20, no. 2, pp. 9–18, 2012, doi: 10.33899/rengj.2012.47390.
- [60] J. Dong *et al.*, "Hybrid Acoustic Noise Analysis Approach of Conventional and Mutually Coupled Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 3, pp. 1042–1051, 2017, doi: 10.1109/TEC.2017.2672741.
- [61] Anwar M. N.; Iqbal Husain; and Arthur V. Radun., "A Comprehensive Design Methodology for Switched reluctance machines," *EEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 6, pp. 1684–1692, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-72730-1_22.
- [62] K. Kiyota, T. Kakishima, and A. Chiba, "Cylindrical Rotor Design for Acoustic Noise and Windage Loss Reduction in Switched Reluctance Motor for HEV Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 1, pp. 154–162, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2466558.
- [63] S. M. Castano, B. Bilgin, E. Fairall, S. Member, and A. Emadi, "Acoustic Noise Analysis of a High-Speed High-Power Switched Reluctance Machine: Frame Effects," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 1, pp. 69–77, 2015.
- [64] P. O. Rasmussen, J. H. Andreasen, and J. M. Pijanowski, "Structural Stator Spacers - A Solution for Noise Reduction of Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 2, pp. 574–581, 2004.
- [65] J. Li, Y. Cho, A. Analysis, and R. Force, "Investigation into Reduction of Vibration and Acoustic Noise in Switched Reluctance Motors in Radial Force Excitation and Frame Transfer Function Aspects," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 4664–4667, 2009.
- [66] M. Abbasian, M. Moallem, and B. Fahimi, "Double-Stator Switched Reluctance Machines (DSSRM): Fundamentals and Magnetic Force Analysis," *IEEE Trans.*
- [44] H. Chen, R. Nie, and W. Yan, "A Novel Structure Single-Phase Tubular Switched Reluctance Linear Motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, pp. 10–13, 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2700007.
- [45] Q. Wang, H. Chen, and R. Nie, "Unbalanced normal force reduction in the eccentric double-sided linear switched reluctance machine," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 10, no. 5, pp. 384–393, 2016, doi: 10.1049/iet-epa.2015.0419.
- [46] X. Xue, K. W. E. Cheng, and Z. Zhang, "Model, analysis, and application of tubular linear switched reluctance actuator for linear compressors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 12, pp. 9863–9872, 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2818638.
- [47] J. F. Pan, N. C. Cheung, and Y. Zou, "Design and analysis of a novel transverse-flux tubular linear machine with gear-shaped teeth structure," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 3339–3343, 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2202377.
- [48] D. Wang, C. Shao, and X. Wang, "Design and Performance Evaluation of a Tubular Linear Switched Reluctance Generator with Low Cost and High Thrust Density," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 7, 2016, doi: 10.1109/TASC.2016.2599202.
- [49] L. Yan, W. Li, Z. Jiao, and I. M. Chen, "Novel tubular switched reluctance motor with double excitation windings: Design, modeling, and experiments," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 86, no. 12, 2015, doi: 10.1063/1.4938092.
- [50] W. Li, C. Y. Chen, L. Yan, Z. Jiao, and I. M. Chen, "Design and modeling of tubular double excitation windings linear switched reluctance motor," *Proc. 2015 10th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2015*, pp. 1686–1691, 2015, doi: 10.1109/ICIEA.2015.7334381.
- [51] S. S. Ahmad and G. Narayanan, "Linearized Modeling of Switched Reluctance Motor for Closed-Loop Current Control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 4, pp. 3146–3158, 2016, doi: 10.1109/TIA.2016.2550521.
- [52] Acha; Enrique; et al., *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Newnes, 2002.
- [53] S. S. Ahmad and G. Narayanan, "Predictive Control Based Constant Current Injection Scheme for Characterization of Switched Reluctance Machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 4, pp. 3383–3392, 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2818646.
- [54] T. Mouli and G. Narayanan, "Magnetic Structure Based Improvement of Output Torque of Switched Reluctance Machine: A Review," *IETE Tech. Rev.*, pp. 1–18, 2022, doi: 10.1080/02564602.2022.2086930.
- [55] C. Lin and B. Fahimi, "Prediction of acoustic noise in switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 1, pp. 250–258, 2014, doi:

- Asymmetric Stator Poles,” vol. 40, no. 4, pp. 2035–2037, 2004.
- [78] Y. K. Choi, H. S. Yoon, C. S. Koh, and S. Member, “Pole-Shape Optimization of a Switched-Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction,” vol. 43, no. 4, pp. 1797–1800, 2007.
- [79] J. W. Jiang, B. Bilgin, and A. Emadi, “Three-Phase 24/16 Switched Reluctance Machine for a Hybrid Electric Powertrain,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 76–85, 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2664778.
- [80] Yasa Y.; SÖZER Y. & Garip M., “High-power density switched reluctance machine development for high-speed spindle applications,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 26, no. 3, pp. 1572–1586, 2018, doi: 10.3906/elk-1706-288.
- [81] H. Hayashi, K. Nakamura, A. Chiba, T. Fukao, K. Tungpimolrut, and D. G. Dorrell, “Efficiency improvements of switched reluctance motors with high-quality iron steel and enhanced conductor slot fill,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 4, pp. 819–825, 2009, doi: 10.1109/TEC.2009.2025425.
- [82] H. Mohan, M. K. Pathak, and S. K. Dwivedi, “Sensorless Control of Electric Drives—A Technological Review,” *IETE Tech. Rev. (Institution Electron. Telecommun. Eng. India)*, vol. 37, no. 5, pp. 504–528, 2020, doi: 10.1080/02564602.2019.1662738.
- [83] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, and B. Fahimi, “Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 58–75, 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2649883.
- [84] K. Kiyota and A. Chiba, “Design of switched reluctance motor competitive to 60-kW IPMSM in third-generation hybrid electric vehicle,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 6, pp. 2303–2309, 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2227091.
- [85] R. T. Naayagi and V. Kamaraj, “A Comparative Study of Shape Optimization of SRM using Genetic Algorithm and Simulated Annealing,” in *Annual IEEE India Conference - Indicon, Chennai, India*, 2005, pp. 11–13. doi: 10.1109/INDCON.2005.1590241.
- [86] E. Afjei, A. Siadatan, and H. Torkaman, “Magnetic Modeling, Prototyping, and Comparative Study of a Quintuple-Set Switched Reluctance Motor,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 8, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2418257.
- [87] N. Vattikuti, V. Rallabandi, and B. G. Fernandes, “A novel high torque and low weight segmented switched reluctance motor,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 1223–1228, 2008, doi: 10.1109/PESC.2008.4592097.
- [67] A. H. Isfahani and B. Fahimi, “Comparison of Mechanical Vibration Between a Double-Stator Switched Reluctance Machine and a Conventional Switched Reluctance Machine,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, pp. 293–296, 2014.
- [68] H. Yang, Y. Lim, and H. Kim, “Acoustic Noise/Vibration Reduction of a Single-Phase SRM Using Skewed Stator and Rotor,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 10, pp. 4292–4300, 2011.
- [69] Y. Zou, K. E. Cheng, N. C. Cheung, and J. Pan, “Deformation and Noise Mitigation for the Linear Switched Reluctance Motor With Skewed Teeth Structure,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, pp. 2–5, 2014.
- [70] C. Gan, J. Wu, Q. Sun, W. Kong, H. Li, and Y. Hu, “A Review on Machine Topologies and Control Techniques for Low-Noise Switched Reluctance Motors in Electric Vehicle Applications,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31430–31443, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2837111.
- [71] T. S. R. Motors *et al.*, “Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 9, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2441035.
- [72] E. Sayed, M. H. Bakr, S. Member, B. Bilgin, S. Member, and A. Emadi, “Gradient-Based Design Optimization of a Switched Reluctance Motor for an HVAC Application,” in *2020 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo (ITEC)*, 2020.
- [73] H. Li, B. Bilgin, S. Member, and A. E. Fellow, “An Improved Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Machines,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1635–1644, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2835773.
- [74] A. Desai, P. C., Krishnamurthy, M., Schofield, N., & Emadi, “Novel Switched Reluctance Machine Configuration With Higher Number of Rotor Poles Than Stator Poles: Concept to Implementation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 649–659, 2010.
- [75] N. K. Sheth, K. R. Rajagopal, and S. Member, “Optimum Pole Arcs for a Switched Reluctance Motor for Higher Torque With Reduced Ripple,” vol. 39, no. 5, pp. 3214–3216, 2003.
- [76] J. W. Lee, H. S. Kim, B. Il Kwon, and B. T. Kim, “New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM Using FEM,” vol. 40, no. 2, pp. 754–757, 2004.
- [77] N. K. Sheth, S. S. S. Member, K. R. Rajagopal, and S. S. S. Member, “Torque Profiles of a Switched Reluctance Motor Having Special Pole Face Shapes and

- [99] Othman, Raghad Adeeb, and Omar Sharaf Al-Deen Al-Yozbaky. "The Effect of Reactive Power Capability of the Inverter on a Hybrid Power System," (*AREJ*), *AL-Rafidain Eng. J.*, vol. 28, no. 1, pp. 193–206, 2023.
- [100] C. Ma and L. Qu, "Multiobjective optimization of switched reluctance motors based on design of experiments and particle swarm optimization," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 3, pp. 1144–1153, 2015, doi: 10.1109/TEC.2015.2411677.
- [101] J. H. Fisch, "Pareto-optimal firing angles for switched reluctance motor control," pp. 90–96, 1997, doi: 10.1049/cp:19971161.
- [102] C. Ma, L. Qu, R. Mitra, P. Pramod, and R. Islam, "Vibration and torque ripple reduction of switched reluctance motors through current profile optimization," *2016 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)*. IEEE, 2016.
- [103] Ren; Ziyang; Dianhai Zhang; and Chang-Seop Koh, "Multi-Objective Worst-Case Scenario Robust Optimal Design of Switched Reluctance Motor Incorporated with FEM and Kriging," in *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE, 2013.
- [104] D. Ilea and M. M. Radulescu, "Multi-Objective Optimization of a Switched Reluctance Motor for Light Electric Traction Applications," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. IEEE, 2010.
- [105] S. Zhang, S. Li, J. Dang, R. G. Harley, and T. G. Habetler, "Multi-objective design and optimization of generalized switched reluctance machines with particle swarm intelligence," *2016 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE)*. IEEE, 2016, doi: 10.1109/ECCE.2016.7855282.
- [106] B. Mirzaeian, M. Moallem, V. Tahani, and C. Lucas, "Multiobjective optimization method based on a genetic algorithm for switched reluctance motor design," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 3, pp. 1524–1527, 2002, doi: 10.1109/20.999126.
- [107] E. Öksüztepe, "In-Wheel Switched Reluctance Motor Design for Electric Vehicles by Using a Pareto-Based Multiobjective Differential Evolution Algorithm," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 6, pp. 4706–4715, 2017, doi: 10.1109/TVT.2016.2618119.
- [108] X. Liu and Z. Q. Zhu, "Stator/rotor pole combinations and winding configurations of variable flux reluctance machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 3675–3684, 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2315505.
- [109] D. H. Lee, T. H. Pham, and J. W. Ahn, "Design and operation characteristics of four-two pole high-speed SRM for torque ripple reduction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 3637–3643, 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2208432.
- [88] A. Labak and N. Kar, "A Novel five-phase pancake shaped switched reluctance motor for hybrid electric vehicles," *2009 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, 2009, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289806.
- [89] M. Moallem, C. M. Ong, and L. E. Unnewehr, "Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched-Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 2, pp. 364–369, 1992, doi: 10.1109/28.126743.
- [90] Y. Tang, "Switched reluctance motor with fractionally pitched windings and bipolar currents," in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No. 98CH36242)*, 1998, vol. 1. doi: 10.1109/ias.1998.732317.
- [91] A. Chiba, K. Kiyota, N. Hoshi, M. Takemoto, and S. Ogasawara, "Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 175–182, 2015, doi: 10.1109/TEC.2014.2343962.
- [92] A. Chiba *et al.*, "Torque density and efficiency improvements of a switched reluctance motor without rare-earth material for hybrid vehicles," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1240–1246, 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2125770.
- [93] X. Cui, J. Sun, C. Gan, C. Gu, and Z. Zhang, "Optimal design of saturated switched reluctance machine for low speed electric vehicles by subset quasi-orthogonal algorithm," *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp. 101086–101095, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929103.
- [94] M. Morimoto, "Efficiency improvement of induction motor by 3-D core made of SMC," in *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe*, 2012, pp. 1–5. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397386.
- [95] A. Michaeliides and C. Pollock, "Design And Performance of a High Efficiency 5-Phase Switched Reluctance Motor," 1995, pp. 266–270.
- [96] A. M. Omekanda and S. Member, "A New Technique for Multidimensional Performance Optimization of Switched Reluctance Motors for Vehicle Propulsion," vol. 39, no. 3, pp. 672–676, 2003.
- [97] S. Li, S. Zhang, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "A survey of electromagnetic-Thermal modeling and design optimization of switched reluctance machines," *2017 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC*, 2017, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002370.
- [98] H. Cheng, H. Chen, and Z. Yang, "Design indicators and structure optimisation of switched reluctance machine for electric vehicles," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 9, no. 4, pp. 319–331, 2015, doi: 10.1049/iet-epa.2014.0291.

IEEE, 2013, doi:
10.1109/IEMDC.2013.6556138.

[110] M. Afifi, H. Rezk, M. Ibrahim, and M. El-Nemr, "Multi-objective optimization of switched reluctance machine design using Jaya Algorithm (MO-Jaya)," *Mathematics*, vol. 9, no. 10, pp. 1–19, 2021, doi: 10.3390/math9101107.

[111] S. Smaka, S. Konjicija, S. Masic, and M. Cosovic, "Multi-objective design optimization of 8/14 switched reluctance motor," *2013 Int. Electr. Mach. drives Conf.*

Improving the Switched Reluctance Motor Performance in Electric Vehicles Based on Changing the Parameters of the Geometry- A Review

Saif Kh. Al-Farhan

saif.21enp17@student.uomosul.edu.iq

Omar Sharaf Al-Deen Yehya

o.yehya@uomosul.edu.iq

Electrical Engineering Department, College of Engineering, University of Mosul, Mosul, Iraq

Received: April 27th, 2023 Received in revised form: June 27th, 2023 Accepted: August 1st, 2023

ABSTRACT

In recent years, Switched Reluctance Machines (SRMs) have attracted increasing interest in Electric Vehicles (EVs) applications due to the fluctuating prices of rare earth magnets (Permenant Magnets - PMs) used in Permanent Magnet Synchronous Machines. PMSMs). It is also characterized by a solid and strong construction, in addition to that it works at high speeds and high temperatures. However, the negatives are the loud noise and high torque ripples. In addition to the relatively low torque density, it poses great challenges for researchers in finding appropriate solutions. Where engineering structure optimization techniques are used to overcome these challenges and enable impedance switched machines (SRMs) to compete with permanent magnet synchronous machines (PMSMs). On the other hand, it is possible to improve the distribution of the materials used in the engineering structure of the key impedance machines within a certain design space within the machine structure by using the engineering structure improvement techniques. This study presents a review on techniques for improving the geometry of SRMs to improve machine performance, since optimizing machine geometry and material distribution at the design stage is of great importance in improving the performance and characteristics of SRMs.

Keywords:

Switched Reluctance Machines; Electric Vehicles; Average Torque; Efficiency; Torque Ripple; Acoustic Noise; Radial Force.