تشخيص أعطال محركات PMSM باستخدام صور Scalogram Wavelet والشبكات العصبية الالتفافية

استخدام الشبكات العصبية الالتفافية (CNN) لتحليل صور Scalogram Wavelet في تشخيص أعطال محركات PMSM

جامعة حلب - كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية . قسم هندسة الميكاترونيكس

إعداد الطالبين: **ملهم فتنة . محمد زين قباني**

إشراف: **م. سعد المصطفى** . السنة: **السنة الرابعة**

١. المشكلة

- محركات **PMSM** تشغّل السيارات الكهربائية والروبوتات وأنظمة التحكم الصناعية ومُشغّلات الطيران.
- أكثر أعطال العضو الثابت شيوعاً - **القصر بين اللفات (inter-turn)** - قد يتطوّر إلى انهيار كامل للملف خلال دقائق.
- الهدف: **كشف الأعطال آلياً وباكراً** من إشارات المحرك نفسه.
- الطرق التقليدية (تحليل طيف التيار) تتطلّب خبيراً يعرف مسبقاً أيّ تردد يراقب، وتضعف عند تغيّر السرعة والحمل.

٠٢ الفكرة

تحويل مشكلة الإشارة إلى مشكلة صورة.

الإشارة >- تقطيع >- CWT >- صورة Scalogram >- CNN >- تصنيف الحالة

(تيار/اهتزاز) (مويجة Morlet (224x224) سليم / عطل بين الملفات

- الشبكة **تتعلّم** بصمات العطل بنفسها - دون هندسة سمات يدوية.
- قناتان مدروستان: **تيار العضو الثابت والاهتزاز.**

٣. منظومة المعالجة

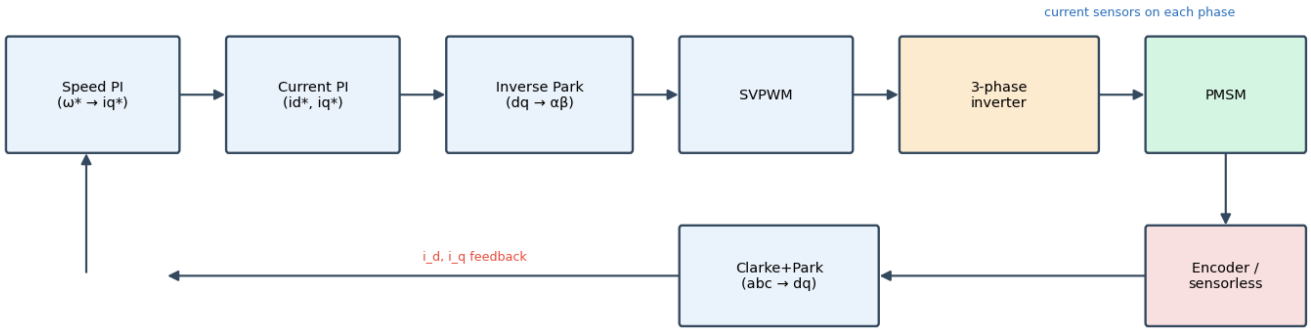
- **المصادر:** مجموعة بيانات KAIST الحقيقية (تيار + اهتزاز)، ومولّد إشارات اصطناعي، ومحاكاة FOC MATLAB (Simscape). +
- **ملف إعدادات واحد + بيان (manfiest) واحد** يربط: إشارة -> scalogram -> تصنيف -> تقسيم - قابل للتكرار بالكامل.
- مُنفَّذة بلغة Python، (TensorFlow/Keras، PyWavelets)، دون الحاجة إلى MATLAB، مع **٣٨ اختبار وحدة + تكامل مستمر (CI).**

٤. محرك PMSM وأعطاله

- PMSM: دوّار بمغناطيس دائم يتعقّب الحقل الدوّار للعضو الثابت <- يدور **بشكل متزامن**، بلا انزلاق <- كفاءة عالية.
- يُقاد عبر **التحكم الموجّه حقلياً (FOC)** - وحسّاسات التيار موجودة أصلاً في المُشغّل.
- الأعطال المدروسة:
  - **القصر بين اللفات** (الأساسي، بيانات حقيقية)
  - **إزالة المغنطة، الحمل الزائد** (اصطناعية)

المحرك ونظام التحكّم

Fig. Field-Oriented Control (FOC) of a PMSM



- عضو ثابت (ملف ثلاثي الطور) + عضو دوّار مغناطيسي؛ يُقاد بعاكس تحت **FOC**.
- حلقة التيّار **ترفض الاضطرابات** <- **تُخفي بصمة العطل في التيّار**.
- ولهذا **يكشف الاهتزاز القِصَر بين اللفّات أفضل بكثير** (نتيجتنا الأساسية).

PMSM مقابل نظائره

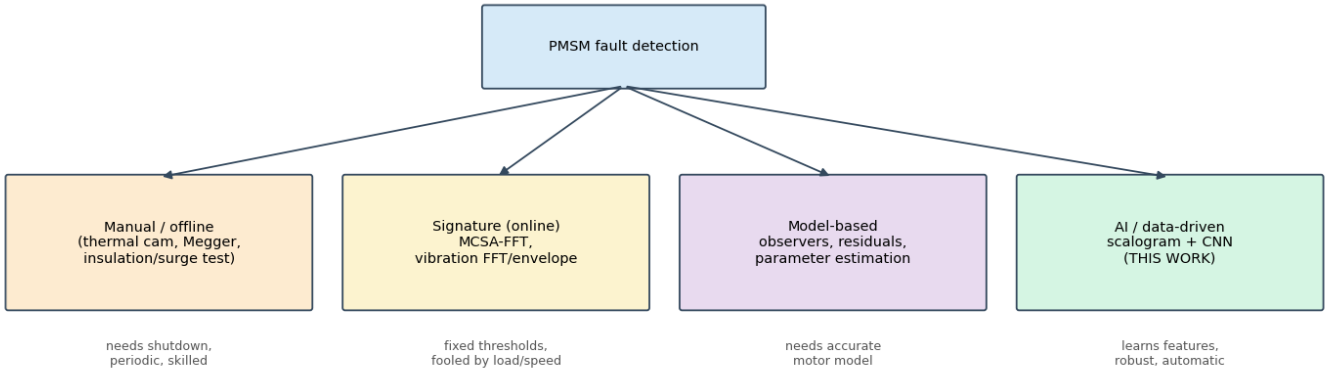
Fig. PMSM vs its relatives (PMDC / BLDC / Induction)

	PMSM	PMDC	BLDC	Induction
Commutation	Electronic (inverter)	Mechanical brushes	Electronic (inverter)	Electronic/DOL
Back-EMF	Sinusoidal	—(DC)	Trapezoidal	Sinusoidal
Efficiency	Very high	Medium	High	Medium
Torque density	Very high	Low	High	Medium
Control complexity	High (FOC)	Low	Medium	Medium/High
Maintenance	Low (no brushes)	High (brushes)	Low	Low
Rotor current	None	Yes (armature)	None	Induced (slip)
Typical use	EV, robotics, servo	Toys, simple drives	Drones, fans	Pumps, industry

- مقابل **PMDC**: نفس سهولة التحكّم بالعزم، لكن دون فُرَش <- صيانة أقل.
- مقابل **BLDC**: قوة دافعة جيبية + FOC <- عزم أنعم وكفاءة أعلى.
- مقابل **الحثّي**: لا تيّار/انزلاق في العضو الدوّار <- كفاءة وكثافة عزم أعلى.

كشف العطل - اليوم مقابل هذا العمل

Fig. Landscape of PMSM fault-detection methods



- يدوي/خارج الخط (حراري، **Megger**، موجة صاعقة) <- يتطلّب إيقافاً، دوري.
- متّصل اهتزاز/MCSA FFT <- عتبات ثابتة، يخدعها الحِمل/السرعة.
- **مخطط CWT + CNN** <- يتعلّم الخصائص، متين، يكشف **أبكر.**

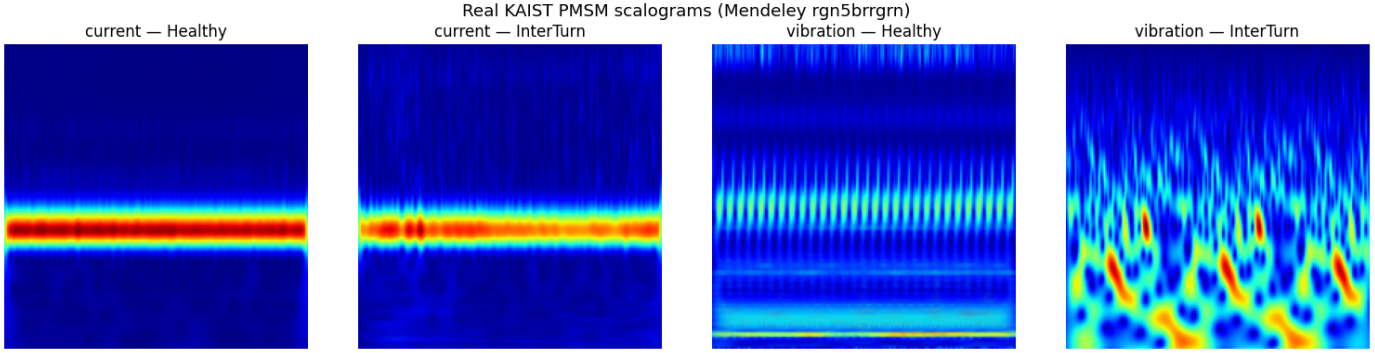
٥. لماذا المويجات وليس فورييه؟

- تحويل فورييه **أعمى زمنياً** - لا يخبرنا متى يحدث التردد.
- إشارات الأعطال **غير مستقرة** (عابرة، تعتمد على الحمل).
- مبدأ عدم اليقين: Deltaf . Deltat =< ثابت - يستحيل دقّة زمنية وترددية مثاليّتان معاً.
- **المويجات** = موجات قصيرة موضعية <- دقّة ترددية متغيّرة، مثاليّة للظواهر العابرة.

٦. تحويل المويجات المستمر (CWT) ومخطط الطيف

- نُقيّس مويجة **Morlet** (مقبض التردد) ونُزلقها (مقبض الزمن).
  - كلّ معامل = **تشابه** الإشارة مع تلك الموجة عند ذلك الزمن.
- **Scalogram** = صورة ملوّنة للطاقة مقابل الزمن (س) والتردد (ص).
- الحُزَم والنطاقات الجانبية الساطعة = بصمات العطل التي تراها الشبكة.

٧. أمثلة على المخططات (بيانات KAIST الحقيقية)



العطل بين اللفات يُثري محتوى الزمن-التردد في قناة **الاهتزاز** بوضوح.

٨. مجموعة البيانات

- **مجموعة KAIST لأعطال العضو الثابت** (Mendeley rgn5brrgrn)، رخصة CC-BY-4.0).
- التيار بمعدّل **100 kHz**، الاهتزاز **25.6 kHz** -> خُفّضا إلى 10 kHz.
- **3,150** مقطع scalogram (نوافذ 0.5 ثانية، تداخل 50%).

القناة	سليم	اللفات بين عطل
تيار	200 4) (تسجيلات	1350 27) (تسجيل
اهتزاز	200 4) (تسجيلات	1400 28) (تسجيل

٩. تقسيم خالٍ من التسرّب

- التقسيم حسب **التسجيل** لا حسب المقطع <- لا نوافذ مترابطة بين التدريب/الاختبار (لا تسرّب بيانات).
  - مُصنّف حسب الفئة، **لكل قناة**، بنسبة 70 / 15 / 15.
- انتباه خاص: **4 تسجيلات سليمة فقط** <- نضمن تسجيلاً واحداً على الأقل في كل قسم ليكون كل صنف قابلاً للتقييم.

١٠. اختلال توازن الأصناف - القضية الجوهرية

- **4 تسجيلات سليمة** مقابل ~60 تسجيل معطوب.
- التدريب الساذج <- النموذج يتنبّأ "معطوب" دائماً: **"دقة" 80% لكن كشف صفري للسليم.**
- الحل: **خفض عيّنة الأغلبية في التدريب/التحقق**، وإبقاء **الاختبار طبيعياً.**
- نُبلِّغ **الدقة المتوازنة** و **macro-F1**، لا الدقة الخام.

١١. بنية الشبكة العصبية الالتفافية

224x224x3

Pool >- Conv128 >- Pool >- Conv64 >- Pool >- Conv32 >-

Softmax >- Dense128 >- Dropout(0.5) >- Flatten >-

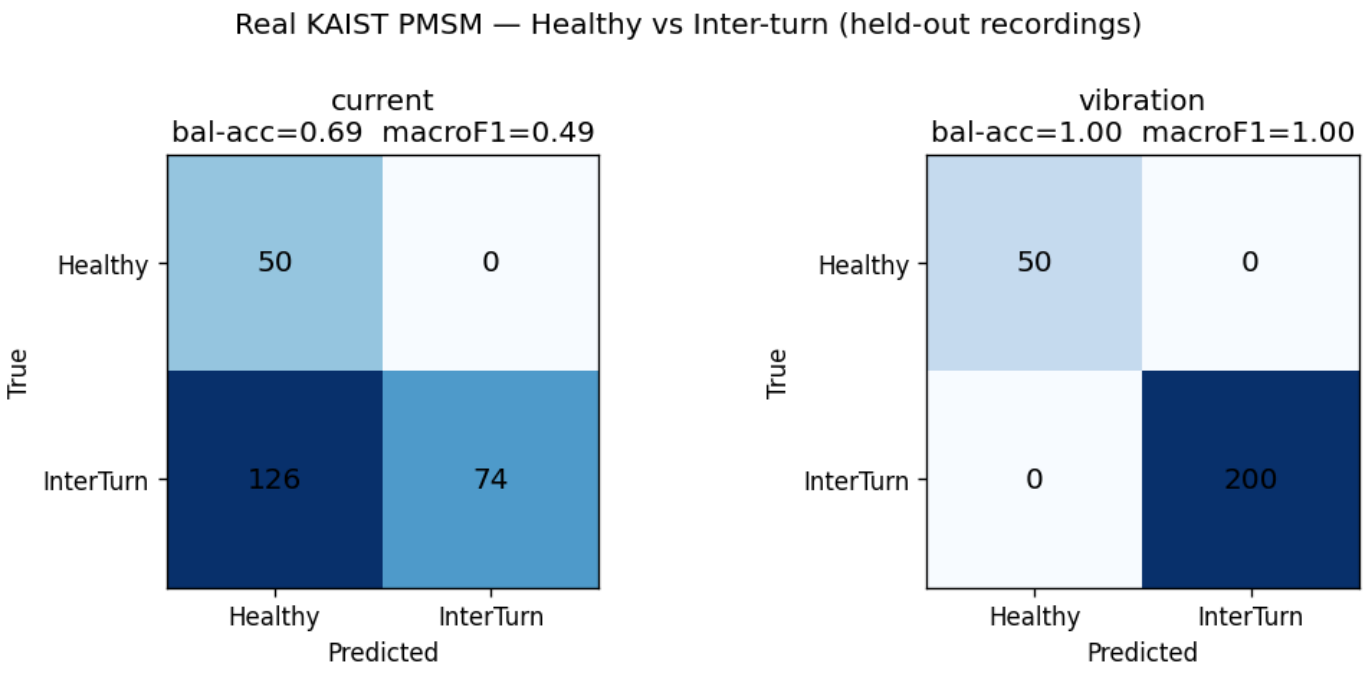
- المُحسِّن، Adam خسارة الإنتروبيا المتقاطعة، إيقاف مبكر، تعزيز بيانات.
- نموذج **الدمج (fusion)**: فرعان (تيار + اهتزاز) <- تجميع متوسّط عام <- دمج <- طبقة كثيفة.

١٢. النتائج - بيانات حقيقية

القناة	المتوازنة الدقة	macro-F1	السليم استدعاء	العطل استدعاء
الاهتزاز	**1.00**	**1.00**	1.00	1.00
الدمج (تيار+اهتزاز)	0.88	0.76	1.00	0.75
التيار	0.69	0.49	1.00	0.37

تسجيلات محجوزة للاختبار، التمييز: سليم مقابل عطل بين اللفات.

١٣. مصفوفات الالتباس



الاهتزاز مثالي؛ التيار يُخطئ معظم الأعطال؛ الدمج بينهما.

١٤. التحليل

- **الاهتزاز » التيار** لكشف العطل بين اللفات - متوقّع فيزيائياً (الاهتزاز يستجيب مباشرة، وFOC يُخمد بصمة التيار).
- **الدمج** يتفوّق على التيار وحده لكن ليس على الاهتزاز وحده.
- **اختيار المقياس مهم**: الدقة المتوازنة كشفت انهيار صنف الأغلبية الذي تُخفيه الدقة الخام.

١٥. تجارب التحسين

- **الموازنة** تمنع انهيار الأغلبية (استدعاء السليم للتيار 0.00 <- 1.00).
- **حجم الصورة**: يُحسّن التيار تدريجياً (0.68->0.76 من 96 إلى 224)؛ الاهتزاز مُشبَع.
- **منحنى التعلّم**: الاهتزاز يكفيه ~46 صورة؛ التيار ثابت ~0.70 مهما زادت البيانات <- القيد جودة الإشارة لا كميّتها.

١٦. القيود

- **4 تسجيلات سليمة فقط** <- النتيجة المثالية للاهتزاز لا تستبعد تماماً تعلّم "هوية التسجيل".
- إزالة المغنطة والحمل الزائد اصطناعية فقط.
- مقارنة الدمج إرشادية لا مضبوطة بدقّة.

١٧. الخلاصة والعمل المستقبلي

- منظومة CNN + scalogram قابلة للتكرار تكشف الأعطال بين اللفات؛ **الاهتزاز يبلغ دقة متوازنة 1.00** على تسجيلات محجوزة.
- مستقبلاً: تسجيلات مستقلّة أكثر؛ مجموعة دمج متعدّدة القنوات متزامنة؛ تصنيف حسب الشدّة؛ التفسيرية ؛(Grad-CAM) النشر اللحظي داخل المُشغّل.

شكراً لكم

أسئلتكم؟

الشيفرة والبيانات والتقرير الكامل:
github.com/molhamfetnah/pmsm-fault-diagnosis-cnn-scalogram