

RESUM

El manteniment de les màquines elèctriques ha estat fonamental per garantir la continuïtat dels processos industrials. Un part important de les investigacions desenvolupades els darrers anys en el camp de la detecció d'averies en màquines elèctriques rotatives s'han centrat en la cerca de característiques discriminatòries entre les magnituds mesurables (mecàniques i elèctriques) dels motors i generadors instal·lats tant en entorns industrials tradicionals com ara bé en sectors emergents com la producció de energia elèctrica a partir de la energia eòlica, el desenvolupament de la tracció elèctrica, etc. Els objectius d'aquestes tècniques de diagnosi són determinar l'estat del motor, identificar el tipus de fallo que s'ha produït i quantificar la severitat del mateix amb la finalitat de desenvolupar accions preventives, correctives i els plans de contingència per tal de minimitzar l'impacte econòmic de l'averia. Una de les opcions més utilitzada per detectar les anomalies degudes a les falles dels propis motors ha estat, conjuntament amb l'anàlisi de les vibracions de la màquina, el anàlisi de les corrents estatòriques del motor. L'ús de la corrent ha estat propiciat a que es una magnitud, el valor instantani de la mateixa i la seua evolució temporal, que està sent mesurada en la instal·lació industrial o, tanmateix, en els equips de control del motor. De no ser així, és una magnitud que pot ser fàcilment mesurada de forma no invasiva utilitzant pinces amperimètriques.

En la literatura científica-tècnica s'hi troben diferents tècniques de anàlisi i processament de la senyal que permeten discriminar l'estat de la màquina elèctrica, és a dir, si es troba en esta sa o en estat d'averia. En termes generals, cadascuna d'aquestes tècniques o mètodes, és apropiat per a l'anàlisi d'una magnitud concreta, un règim de treball específic, per a detectar uns tipus de falles determinades, etc. I cadascuna d'aquestes tècniques presenta els resultats d'una manera específica i amb diferències amb no sols els tipus de tècnica sinó també dependent del tipus de fallada, de les condicions de funcionament de la màquina, etc. Per tant, aquests mètodes, presenten una clara limitació intrínseca ja que es necessita de personal altament qualificat i amb capacitat d'interpretar els resultats en funció de la tècnica utilitzada, tipus de fallada, règim de treballa, per discernir el estat en el que s'hi troba la màquina.

Per tot això, resulta necessari la tasca d'automatitzar aquesta labor mitjançant l'ús i aplicació de tècniques de aprenentatge e intel·ligència artificial basats en classificadors. Per tant, la investigació encaminada al desenvolupament de nous sistemes de detecció que maximitzen la precisió, tenint en compte les característiques disponibles, és prioritària. Per millorar aquestes característiques de classificació, cada vegada es proposen sistemes més complexos basats en sistemes experts amb capacitat d'autoaprenentatge per identificar falles. Un exemple d'aquests són els sistemes de classificació multidimensionals o sistemes experts basats en la simulació d'un "cervell" o xarxa neuronal.

Tenint en compte que la meua formació abasta diversos camps que van, des de l'automàtica industrial fins els sistemes experts e intel·ligència artificial, he procurat integrar els meus coneixements en aquests camps per a desenvolupar, en aquesta tesi doctoral, un "suprasistema" automàtic capaç de generar sistemes òptims de diagnosi de falles. Els sistemes són adaptables a la tipologia de la màquina, el que permetrà que, mitjançant aquest "suprasistema", es puguin desenvolupar automàticament nous sistemes òptims per a la diagnosi de altres tipus de màquines. Els sistemes de diagnosi generats són òptims. D'una banda maximitzen la precisió en la detecció de la fallada i, d'altra banda, minimitzen els costos computacionals. A més els sistemes experts de classificació s'han adaptat, tenint en compte les característiques discriminatòries que s'obtenen en funció dels mètodes i transformacions utilitzades, amb l'objectiu de obtindre el millor sistema de detecció per a cada tipus de falta.

El "suprasistema" proposat s'encarrega de generar el sistema de diagnosi òptim per a la detecció de fallades en motors asíncrons de inducció. Sistema que estarà compost per una tècnica de diagnosi i per un sistema classificador expert. Per al seu desenvolupament s'han seguit les següents etapes:

- **Adquisició de dades.**

S'ha utilitzat un banc de proves format per dos motors acoblats mecànicament pels seus eixos. El motor a estudiar es un motor asíncron de inducció que pot estar en esta sa o en estat de fallida. En canvi, l'altre motor acoblat es un motor síncron de imants permanents que treballa oferint el par resistent que ha de vèncer el motor analitzat. Durant els assajos s'han enregistrat les tres corrents de fase del motor així com la velocitat per a les següents condicions de funcionament:

- Velocitat i par resistent constants
- Velocitat variable i par resistent constant.
- Velocitat constant i par resistent variable.
- Velocitat i par resistent variables.

Tots els assajos han estat repetits amb la finalitat de comprovar el correcte funcionament. A més, s'han realitzat diferents assajos de cadascun dels quatre blocs comentats anteriorment, amb diferents velocitats i amb distints nivells de par resistent. S'han realitzat un total de 735 assajos als quals se'ls aplicaran les tècniques que seran analitzades amb el suprasistema.

- **Aplicació de les tècniques i/o mètodes de diagnosi.**

S'han utilitzat diferent tècniques de diagnosi per obtindre les característiques rellevants des del punt de vista de la diagnosi de la màquina. En aquesta tesis s'aporten dos tècniques novedoes, l'ús de la finestra Prolate i l'aplicació de la transformada de Fourier curta en freqüència (SFFT). Així doncs, les senyals utilitzades per a la diagnosi han estat:

- La corrent de fase del estator.
- La corrent de fase del estator multiplicada per una finestra de tipus Hanning (Han).

Les tècniques utilitzades per al anàlisi en règim estacionari són:

- Anàlisi de la senyal.
- Anàlisi de la transformada de Hilbert de la senyal (mòdul de la senyal analítica).
- Anàlisi de la transformada Cepstrum de la senyal.
- Anàlisi de la transformada del mòdul de Park de la senyal.
- Anàlisi de l'ordre d'harmònic (HOTA) de la senyal.

La senyal s'ha convertit al domini de la freqüència mitjançant:

- Transformada de Fourier de la senyal.
- Mètode de Welch de la senyal.

Concloent, s'han explorat fin 20 mètodes distints, resultat de la combinació de les possibilitats descrites, per a la diagnosi en règim estacionari.

Les tècniques aplicades al règim transitori han estat:

- Anàlisi de l'ordre d'harmònic (HOTA) de la senyal mitjançant l'ús de la transformada de Fourier curta en temps (STFT) i la finestra Gaussiana.
- Anàlisi de l'ordre d'harmònic (HOTA) de la senyal mitjançant l'ús de la transformada de Fourier curta en temps (STFT) i la finestra Prolate. (***L'ús d'aquesta finestra en la diagnosi és una aportació d'aquesta tesi***).
- Anàlisi de l'ordre d'harmònic (HOTA) de la senyal mitjançant l'ús de la transformada de Fourier curta en freqüència (SFFT) i la finestra Gaussiana. (***L'ús d'aquesta transformada és una aportació de la tesis***).

- Anàlisi de l'ordre d'harmònic (HOTA) de la senyal mitjançant l'ús de la transformada de Fourier curta en freqüència (SFFT) i la finestra Prolate.

A totes aquestes variants de HOTA se'ls ha aplicat, a més, una sèrie de millores amb respecte a l'algoritme original presentat en la literatura tècnica. Aquestes millores suposen una reducció en el temps de càlcul i en l'espai de memòria necessari. Aquestes millores son essencials per al disseny d'un sistema expert. *Les millores proposades en aquesta tesis són:*

- ***Inclusió d'una etapa de filtrat pas banda per eliminar les altes freqüències.***
- ***Minimització del efectes de costat.***
- ***Algoritme més ràpid per a l'ajust òptim de la finestra de filtrat.***

En conclusió, per al règim transitori s'han analitzat quatre mètodes de diagnosi diferents.

▪ **Obtenció de les característiques rellevants.**

Per cada una de les tècniques utilitzades s'obté una dupla de característiques rellevants per mostra o senyal mesurada del motor. Així doncs s'obté una matriu de vectors de característiques rellevants de dimensions igual al nombre de mètodes de diagnosi utilitzats (20 estacionari més 4 en transitori), on cada vector té la dimensió del nombre d'assajos que s'han realitzat (més de 700).

▪ **Obtenció dels classificadors.**

Es desenvolupen distints tipus de classificadors per cada un dels vectors de característiques obtinguts amb cadascuna de les tècniques de diagnosi utilitzades. Aquests classificadors estan basats en:

- Xarxes neuronals artificials d'una capa oculta.
- Xarxes neuronals artificials de dues capes ocultes.
- Màquina de vectors de suport que empren un kernel de funció polinomial.
- Màquina de vectors de suport que empren un kernel de funció de base radial gaussiana.

Dins de cada tipus de classificador es generen distints classificadors en funció de l'algoritme d'optimització utilitzat (sistema de validació empleat), generant multitud de classificadors de diferents coeficients fins obtenir l'òptim.

▪ **Selecció del sistema expert òptim**

A l'última etapa, s'analitzen els resultats obtinguts i es realitza la selecció del sistema de diagnòstic òptim compostos de un classificador i una tècnica de diagnosi. El suprasistema obtingut aporta els següents avantatges:

1. Obtenir un sistema de diagnosi òptim final.
2. Obté diversos sistemes de diagnosi localment òptims (per a la mateixa tècnica i sistema expert) amb tots els temps obtinguts del procés d'entrament i el temps de diagnosi estimats. Així, el suprasistema aporta, no sols una solució final òptima, sinó que a més permet al operador una de les solucions alternatives generades que son localment òptimes en el cas que fóra necessari ajustar-se a alguna limitació en el temps de càlcul.
3. El suprasistema es totalment autònom. L'operador deu aportar sols les mostres del motor especificat i el suprasistema genera el sistema òptim de diagnosi sense necessitat de que l'operari intervengui.

4. El suprasistema es adaptable al tipus de motor de inducció, d'aquesta forma pot generar un sistema de diagnosi específic i òptim per a cada tipus de motor.

La tesis s'ha estructurat con s'indica a continuació:

- El capítol 1 inclou una breu introducció que serveix com a punt de sortida i es presenten els principals objectius d'aquesta tesi.
- En el capítol 2 es presenta una revisió científico-tècnica dels tipus de fallades que apareixen en les màquines elèctriques rotatives, així com de les principals tècniques d'anàlisi de senyal aplicades al camp de la diagnosi. S'inclou, a més, una revisió dels principals sistemes de intel·ligència artificial utilitzades.
- El capítol 3 es centra en una descripció dels sistemes de classificació a utilitzar en el desenvolupament de la tesis i les seues característiques.
- En el capítol 4 es descriu la bancada de proves utilitzada així com una descripció dels assajos realitzats i de la gestió de les senyals obtingudes.
- En el capítol 5 es presenten les característiques rellevants en règim estacionari. També es presenta el desenvolupament del sistema per a utilitzar-se en aquest règim de treball així com els resultats obtinguts.
- En el capítol 6 es presenten les característiques rellevants en règim transitori. També es presenta el desenvolupament del sistema per a utilitzar-se en aquest règim de treball així com els resultats obtinguts.
- Finalment, en el capítol 7 es presenten les conclusions i principals aportacions d'aquesta tesi en el camp de la diagnosi de màquines elèctriques. També s'inclouen les futures línies d'investigació que es pretenen abordar en el futur.