

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Elèctrica

Títol: Resolució del flux de càrregues amb mètode d'incrustació holomòrfica

Document: Resum

Alumne: Josep Fanals Batllori

Tutor: Sergio Herraiz Jaramillo

Departament: Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica

Àrea: Enginyeria elèctrica

Convocatòria (mes/any): juny/2020

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	2
2. MÈTODE D'INCRUSTACIÓ HOLOMÒRFICA	3
3. EINES	4
4. RESULTATS	5
5. CONCLUSIONS	6

1. INTRODUCCIÓ

El flux de càrregues d'un sistema elèctric de potència correspon a la solució en règim permanent de totes les tensions i potències de la xarxa. La seva importància s'evidencia a l'hora de determinar el millor punt d'operació i paral·lelament en el moment de planificar l'expansió dels sistemes actuals. En essència, les equacions que hi intervenen són de tipus no lineal.

Això comporta que típicament s'hagin utilitzat mètodes iteratius, com el de Gauss-Seidel o el de Newton-Raphson. Avui en dia el primer d'ells ha quedat en desús, mentre que el segon s'ha popularitzat, com també ho han fet les seves variacions. No obstant això, aquest mètode no sempre permet arribar a la solució correcta. A vegades divergeix, i en d'altres, convergeix a una solució invàlida. Tot plegat comporta que no sigui un recurs totalment fiable.

L'any 2012 Antonio Trias va presentar un mètode fonamentat en la incrustació holomòrfica, que comercialment va ser encunyat com a HELM™ (Holomorphic Embedding Load-Flow Method). Construeix la solució de manera directa, és a dir, sense iterar. A més a més resulta capaç d'arribar a la solució correcta quan aquesta existeix, així com d'indicar aquells casos en què el sistema esdevé irresoluble.

Aquest projecte tracta de desenvolupar teòricament les expressions que intervenen en aquest darrer mètode, que d'ara per endavant s'anomenarà mètode d'incrustació holomòrfica. Addicionalment s'implementa com un programa escrit en Python que aglutina les seves funcionalitats.

En global, el mètode ofereix tres eines que permeten guanyar informació dels sistemes: els aproximants Sigma, els aproximants de Thévenin i el mètode de Padé-Weierstrass.

Amb tot això s'estudien xarxes de test que treballen tant en una situació poc carregada com en un punt d'operació proper al col·lapse de tensions. Es busca determinar si el mètode d'incrustació holomòrfica permet assolir la solució correcta en ambdós casos. Sobretot en aquells sistemes més propers al límit se'l compara amb els mètodes iteratius tradicionals. Per altra banda, s'aplica el mètode d'incrustació holomòrfica en un circuit de corrent continu i en un altre que conté una càrrega no lineal.

2. MÈTODE D'INCRUSTACIÓ HOLOMÒRFICA

El mètode d'incrustació holomòrfica tracta les incògnites com a sèries del tipus:

$$C(s) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k s^k, \quad (\text{Eq. 1})$$

on $C(s)$ representa una incògnita del flux de càrregues (sigui tensió o potència reactiva), c_k un dels coeficients i s simbolitza la variable complexa. El mètode anuncia que avaluar $C(s = 1)$ proporciona la solució final. Teòricament les sèries es conformen per infinitat de coeficients, però a la pràctica, sovint se n'utilitzen entre 20 i 40.

El nom del mètode prové de què per un costat s'incrusten les incògnites i equacions, és a dir, que depenen de la variable s ; i per l'altre costat, les sèries resulten funcions holomòrfiques, de manera que es defineixen en un subconjunt obert del pla complex i són complexament diferenciables en qualsevol dels punts.

L'avantatge de convertir les incògnites en sèries es troba en el fet que es descompon un problema d'equacions no lineals en sistemes d'equacions lineals, tants com el nombre de coeficients escollit. Així, en lloc d'iterar, se solucionen aquests conjunts d'equacions per calcular suficients coeficients. Seguidament s'avaluen totes les sèries a $s = 1$ i s'obté la solució final.

El plantejament del mètode no és únic, ja que en funció de com s'incrusten les equacions, la formulació a desenvolupar pel càlcul dels coeficients varia. En aquest projecte es presenten dues formulacions. Una d'elles ha resultat ser una contribució d'aquest treball. L'altra és l'original del mètode, que si bé d'entrada afegeix complexitat, esdevé funcional amb tots els recursos addicionals.

Cal notar que el camp d'aplicació del mètode d'incrustació holomòrfica no està limitat als sistemes elèctrics de potència de transport i distribució. S'ha adaptat per a una càrrega no lineal i un circuit de corrent continu a través d'un plantejament similar.

3. EINES

Una vegada calculats els coeficients de les sèries, aquestes s'avaluen a $s = 1$ per a conèixer el seu valor definitiu. La forma més rudimentària de fer-ho consisteix a sumar tots els seus coeficients. Encara que en sistemes poc carregats aquesta sigui una opció interessant, hi ha situacions en què el radi de convergència de les sèries resulta inferior a la unitat.

Quan el radi de convergència és inferior a la unitat, s'han d'emprar mètodes de continuació analítica. Permeten avaluar el resultat final de les sèries, encara que el sistema estigui molt carregat i per tant mal condicionat, o encara que es disposi de pocs coeficients. Els aproximants de Padé es perfilen com l'eina de continuació analítica per excel·lència. Existeixen altres mitjans, basats en relacions de recurrència, que també són vàlids.

Per esbrinar si el sistema opera a prop del punt de col·lapse de tensions es fa ús dels aproximants Sigma. El seu càlcul depèn dels coeficients de les sèries de tensió. Es tracta d'una eina de diagnòstic perquè per un costat justifica numèricament si la solució és correcta, i per l'altre, representa gràficament l'estat del sistema. Així, cada bus se simbolitza a través d'un punt, el que possibilita fer-se una idea qualitativa de la situació a simple cop d'ull.

Per altra banda, els aproximants de Thévenin s'utilitzen per trobar els mòduls de tensió al voltant del punt de col·lapse. Amb ells es tracen les corbes PV i QV, que indiquen els canvis que pateix el mòdul de tensió segons la potència activa i reactiva respectivament. Un dels seus punts forts està en poder calcular simultàniament els voltatges que corresponen a un punt de treball estable i inestable.

Hi ha sistemes que es troben mal condicionats, perquè per exemple els consums han augmentat, el que complica la resolució. En aquests casos convé utilitzar el mètode de Padé-Weierstrass. Avalua les sèries inicials i en calcula de noves, tantes com sigui necessari fins que l'error disminueix notablement. Això permet assolir errors acceptables malgrat que la solució del flux de càrregues es presenti com un repte.

Tots aquests recursos són propis del mètode d'incrustació holomòrfica. Cap d'ells és compatible amb els mètodes iteratius.

4. RESULTATS

Se seleccionen sis sistemes de test per validar el mètode d'incrustació holomòrfica: un cas d'11 busos mal condicionat, la xarxa IEEE14, la IEEE30, el sistema Nord Pool de 44 busos, la IEEE118 i la PEGASE2869. Compten amb tants busos com el seu nom indica. Tots ells es resolen en una situació de càrrega relativament baixa, i llavors es varien les potències per determinar com responen el mètode d'incrustació holomòrfica i els mètodes iteratius.

A la situació inicial, per mitjà dels aproximants Sigma, s'aprecia que tots els sistemes mostren una distribució de punts típica de sistemes ben condicionats, en excepció del cas d'11 busos. Aquest sistema mereix especial atenció donat que el Newton-Raphson bàsic no el soluciona correctament tot i que convergeix. Les tensions en alguns busos són extremadament baixes. Per contra, amb les dues formulacions del mètode d'incrustació holomòrfica s'arriba al resultat correcte. A més a més, els aproximants de Thévenin indiquen que les tensions baixes del Newton-Raphson corresponen a les d'una situació de treball inestable.

Les dues formulacions són funcionals a l'hora de trobar la solució final de sistemes poc carregats. Els gràfics Sigma compleixen com a eina de diagnòstic. La comparació dels aproximants de Padé amb els mètodes recurrents posa de manifest que n'hi ha de competitius.

Quan les xarxes treballen més carregades, en tots elles els punts del gràfic Sigma s'apropen cap als límits. En aquestes situacions el Newton-Raphson sovint soluciona tots els sistemes correctament. Per la seva banda, els errors amb el mètode d'incrustació bàsic són inacceptables, de l'ordre de 10^{-2} , per exemple. Així i tot, el Padé-Weierstrass parteix d'aquestes solucions i les millora. S'aconsegueixen errors de l'ordre de 10^{-10} . També es guanya informació amb els aproximants de Thévenin. Representen les corbes PV i QV amb exactitud a prop del punt de col·lapse.

Pel que fa al circuit de corrent continu i al d'una càrrega no lineal, en els dos casos el mètode d'incrustació holomòrfica assoleix la solució correcta. En el segon exemple s'arriba al mateix resultat final que amb el Gauss-Seidel.

5. CONCLUSIONS

El mètode d'incrustació holomòrfica s'ha programat en Python i posteriorment s'ha validat, de tal manera que en tots els sistemes estudiats, carregats o descarregats, ha assolit la solució correcta. En aquest aspecte es presenta com una alternativa als mètodes iteratius tradicionals, que a més, es fonamenta en altres principis.

Els sistemes de potència s'han treballat a partir de dues formulacions: la pròpia i l'original. Plantegen el problema des d'enfocaments diferents però al cap i a la fi sovint les dues poden solucionar el flux de càrregues satisfactòriament. La formulació pròpia és una contribució d'aquest treball i s'ha integrat en el programari GridCal, que es tracta d'una plataforma popular de codi obert.

El rang d'aplicació del mètode d'incrustació holomòrfica va més enllà dels sistemes de transport i distribució. S'ha comprovat que també és adequat per a un circuit de corrent continu i un sistema amb una càrrega no lineal.

El principal avantatge del mètode d'incrustació holomòrfica està en el ventall d'eines que incorpora. Els aproximants Sigma identifiquen si la solució és correcta i obtenen informació dels sistemes encara que siguin irresolubles, cosa que no permeten els mètodes iteratius. Els aproximants de Thévenin troben les dues solucions de tensió. Contrasta amb els mètodes iteratius, que no disposen de control per calcular amb certesa l'una o l'altra. A més a més, amb el Padé-Weierstrass es refinen les solucions per treure resultats satisfactoris.

Tot això converteix el mètode d'incrustació holomòrfica en un instrument complet a l'hora de solucionar el flux de càrregues, fins i tot, més que els mètodes iteratius.