

CHALMERS



Automatiserad klassificering av elnätstörningar

Master of Science Thesis

DAVID ANDERSSON

MSc in Computer Engineering 60p (Degree of Civilingenjörsexamen, eq. 270p)

Department of Electric Power Engineering

Division of Energy and Environment

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Göteborg, Sweden, 2008

Sammanfattning

Användandet av elektronisk utrustning ställer ökade krav på stabila kraftdistributionssystem. En spänningsdipp på 100 ms kan i vissa industrier leda till förluster på flera miljoner. Ett projekt [5] från 2004 beräknade industrins kostnader för vissa typer av dippar och avbrott i Sverige till mellan 1-1,5 miljarder kronor per år. För att felsöka och för att förebygga fel finns därför ett behov av att studera störningar på elnätet.

Målsättningen med examensarbetet har varit att genom litteraturstudier undersöka klassificering av elnätstörningar och att implementera något av den inhämtade kunskapen. Rapporten ska ge en överblick över området klassificering av dippar.

Arbetet har utförts på Metrum Sweden AB. Inledningsvis studerades litteratur i ämnet innan en algoritm valdes ut för implementation. Avsaknaden av synkroniserad mätdata var ett problem en bit in i arbetet. Trots en stor mängd mätdata var det ett problem att hitta data innehållande intressanta störningar. Algoritmen kördes för mätdata och flera tillverkade dippar.

Algoritmen lyckades identifiera tre av fyra konstruerade dippar korrekt. Mätdata identifierades delvis korrekt. Algoritmens prestanda kan sannolikt förbättras.

Det är möjligt att implementera en algoritm som klassificerar dippar, men teoretiska begränsningar och oförutsägbar mätdata komplicerar processen. Algoritmen är användbar men behöver fortsatt utveckling för att nå en högre grad av tillförlitlighet.

Abstract

The use of electrical equipment increases the demand for robust power distribution systems. A sag of 100 ms can in some industries cause losses of several million Swedish crowns. A project [5] from 2004 estimated the cost of certain types of sags and interruptions for the industry in Sweden to a yearly cost of between 1-1,5 billion Swedish crowns. Therefore, to troubleshoot and prevent errors there is a need to study disruptions on the power grid.

The objective of this Masters Thesis has been to through studies of current research investigate classification of power grid disturbances and to implement something of the studied material. The report would give an overview over the subject of classification of sags.

The work has taken place on Metrum Sweden AB. In the beginning, current research in the field was studied before an algorithm to implement was chosen. The lack of synchronized measured data was a problem for a fair part of the work. Despite a large set of data there was a problem in finding data containing disturbances relevant for studies. The algorithm was run for measured data and several generated sags.

The algorithm correctly identified three out of four generated sags. Measured data was identified partially correct. The performance of the algorithm can likely be improved further.

It is possible to implement an algorithm that classifies sags, but theoretical limitations and unpredictable measured data will complicate the process. The studied algorithm is useful but needs continued development to reach a higher level of reliability.

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	6
1.1 Bakgrund.....	6
1.2 Syfte.....	6
1.3 Rapportens upplägg.....	6
2 Elsystem och dippteori.....	7
2.1 Elnätet.....	7
2.2 Definition av dippar.....	7
2.3 Symmetriska komponenter.....	8
2.3.1 Introduktion.....	8
2.3.2 Klassificering med symmetriska komponenter.....	9
2.4 ABC-klassificeringen.....	10
2.4.1 Propagering av dippar genom transformatorer.....	12
2.5 Jämförelse med ABC-metoden.....	15
3 Algoritmer.....	17
3.1 Klassificering med symmetriska komponenter.....	17
3.1.1 Effektivvärde.....	17
3.1.2 Synkroniserad signal och komplexa spänningar.....	17
4 Fallstudier.....	19
4.1 Inledning.....	19
4.2 Fall 1, syntetisk dipp av typ C _b	19
4.2.1 Specifikationer.....	19
4.2.2 Resultat.....	19
4.3 Fall 2, syntetisk dipp av typ D _c med uniformt brus.....	20
4.3.1 Specifikationer.....	20
4.3.2 Resultat.....	20
4.4 Fall 3, syntetisk dipp av typ D _c med vitt brus.....	21
4.4.1 Specifikationer.....	21
4.4.2 Resultat.....	21
4.5 Fall 4, syntetisk dipp av typ C.....	22
4.5.1 Specifikationer.....	22
4.5.2 Resultat.....	22
4.6 Fall 5, syntetisk dipp av typ F.....	23
4.6.1 Specifikationer.....	23
4.6.2 Resultat.....	23
4.7 Fall 6, mätdata 1.....	24
4.7.1 Specifikationer.....	24
4.7.2 Resultat.....	24
4.8 Fall 7, mätdata 2.....	25
4.8.1 Specifikationer.....	25
4.8.2 Resultat.....	25
4.9 Fall 8, mätdata 3.....	26
4.9.1 Specifikationer.....	26
4.9.2 Resultat.....	26
4.10 Utvärdering av metoden.....	27

Automatisk klassificering av elnätstörningar

4.10.1 Introduktion.....	27
4.10.2 Teoretiska begränsningar.....	27
4.10.3 Testning.....	27
5 Resultat.....	28
5.1 Metod.....	28
5.2 Utvärdering av fallstudie.....	28
5.3 Slutsats.....	28
5.4 Fortsatt arbete.....	29
6 Referenser.....	30

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Elkvalitet och Elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) avser den elektriska växelverkan mellan kraftnätet och slutanvändarens utrustning. [3] Användandet av elektronisk utrustning ställer ökade krav på en stabil kraftkälla. En halvledarindustri har produktionsstider på två till tre månader, och vid ett produktionsstopp måste allt som ligger i pipeline slängas. Där kan en enda spänningsdipp på 100 ms leda till förluster på flera miljoner. Projektet *Utveckling Elkvalitet* [5] som slutfördes 2004 beräknade industrins kostnader för dippar och avbrott under tre minuter till mellan 1-1,5 miljarder kronor per år. För att felsöka och för att förebygga fel finns därför ett behov av att studera störningar på elnätet.

ABB [4] beskriver arbetet med elkvalitet som att lösa sju typer av problem: verkningsgrad, övertoner, spänningssänkningar, spänningshöjningar, transienter, flimmer och osymmetri. Jag har valt att studera spänningssänkningar, så kallade dippar.

Vanligtvis brukar en dipp definieras som att medelvärdet av spänningen under en period sjunker under 90% av den nominella spänningen under minst 10 ms till högst 90 s [4]. Orsaker till en dipp kan vara t.ex. åska, jordfel eller start av stora motorer. Bollen et al [2] har beskrivit två kompletterande klassificeringar av spänningsdippar och algoritmer för att klassificera data enligt dem.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att genom litteraturstudier undersöka klassificering av dippar, med målet att implementera något av den inhämtade kunskapen. Ur en datamängd ska slutsatser kunna dras om vad det förekommer för störningar och i möjlig mån dess ursprung och andra intressanta egenskaper. Arbetet ska generera en rapport och Matlab-skript som implementerar någon form av klassificering.

1.3 Rapportens upplägg

Arbetet är upplagt som en litteraturstudie. Inledningsvis läggs mycket fokus på den teoretiska bakgrunden för att sedan gå över till en praktisk tillämpning.

Först presenteras grundläggande teori kring elkvalitet. Sedan presenteras två klassificeringsordningar. Algoritmen för klassificering presenteras; först ges en teoretisk överblick av algoritmen och sedan testas denna med ett antal tillverkade och uppmätta dippar. I samma avsnitt presenteras fallstudier av mätdata och alla resultat går igenom. Därefter analyseras resultaten och utrymme ägnas åt framtida arbete.

2 Elsystem och dippteori

2.1 Elnätet

I Europa har vi ett elnät som använder en växelström med frekvensen 50 Hz, dvs tre åtskilda spänningar med frekvensen 50 Hz som är fasförskjutna 120° från varandra. När strömmen ska transporteras långa sträckor transformeras den upp till (eller ner från) en högre spänning med hjälp av en transformator. Fel kan uppstå på godtycklig punkt i nätet och kan därför färdas genom flera transformatorer innan det kommer till en mät punkt. Det visar sig att de dippar som förekommer kan delas in i ett begränsat antal typer vilket diskuteras i detalj i efterföljande kapitel.

2.2 Definition av dippar

Det finns ingen entydig definition på vad som utgör en dipp. Några definitioner som återfinns i litteraturen är

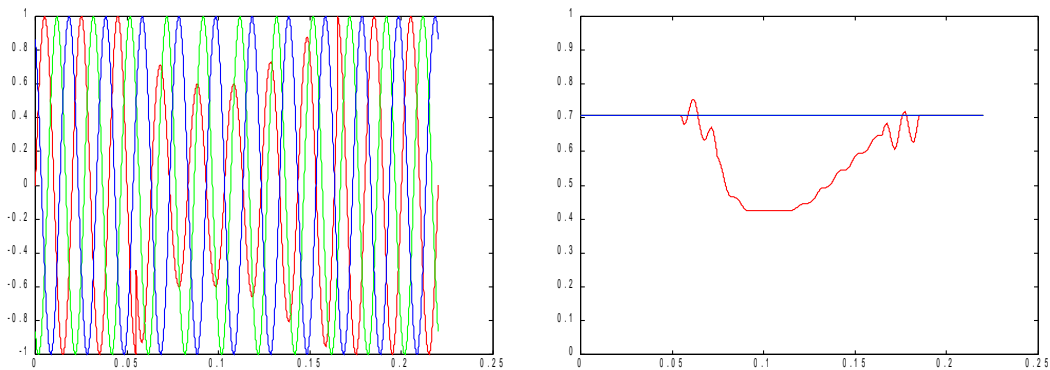
- En plötslig minskning av spänningen vid en punkt i elnätet, följt av återhämtning i spänningen efter en kort tid, mellan en halvperiod till några sekunder. [12]
- En minskning av spänningens effektivvärde eller strömmen som varar mellan 0,5 perioder till 1 minut. [10]
- En minskning av spänningens effektivvärde som är mellan 10% till 90% av den nominella spänningen, som varar mellan 0,5 perioder till 1 minut. [13]
- En minskning av spänningens effektivvärde som är större än 10% av den nominella spänningen, som varar mellan 0,5 perioder och 1,5 minuter. [4]

Resten av rapporten kommer att betrakta en dipp som en minskning av spänningens effektivvärde till under 90% av det nominella värdet, som varar längre än en halvperiod. Denna begränsning har praktiska motiveringar. En dipp som inte är djupare än 90% av den nominella spänningen är inte lika intressant att studera eftersom effekten på utrustning är liten. En dipp med en mindre kvarvarande spänning än 10% av den nominella spänningen betraktas som ett avbrott, men då vi inte studerar avbrott är den distinktionen mindre viktig att upprätthålla. Om en uppmätt dipp varar kortare tid än en halvcykel så betraktas den som en transient istället för en dipp, eftersom effekten på utrustning är liten jämfört med en dipp av längre varaktighet. Dessutom är det svårt att beräkna bland annat effektivvärdet för en signal som varar kortare tid än en halvcykel. Jag har valt att inte ha någon nedre gräns för djupet av en dipp och ingen övre gräns för varaktigheten, men det kan lätt implementeras om behov skulle föreligga.

Algoritmen som implementerats under exjobbet mäter en dipp från det ögonblick då effektivvärdet i en av faserna går under 90% till dess att effektivvärdet i alla tre faserna är över 92%. Detta är för att inte få falska dippregistreringar om effektivvärdet varierar precis kring gränsvärdet. Min bedömning är att det är en rimlig förenkling som inte påverkar resultatet negativt.

En annan definition av dippar har föreslagits [11], som förutom varaktighet och lägsta effektivvärde för en dipp mäter medelvärdet av effektivvärdet under dippen. Fördelen är att det blir lättare att se hur elektrisk utrustning påverkas.

Figur 2.1 visar (t.v.) de tre faserna i ett växelströmsystem där en dipp inträder och (t.h.) effektivvärdet för de tre faserna.



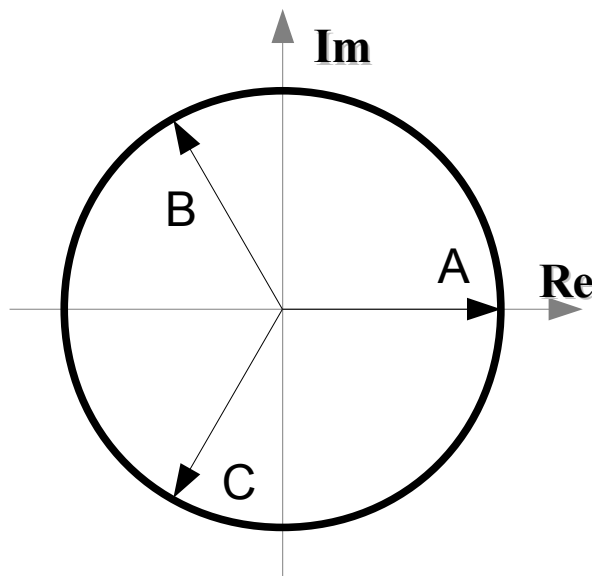
Figur 2.1. T.v.: vågformsdata för en dipp i fas a (röd) över 11 perioder.
T.h.: effektivvärde för samma dipp. Referensen (normalvärdet) är 0,7. Fas b och c är överlagrade. Den horisontella skalan är i sekunder.

2.3 Symmetriska komponenter

2.3.1 Introduktion

Symmetriska komponenter är ett sätt att beskriva obalansen för ström och spänning i ett trefassystem. [14]

Varje fas i ett trefassystem kan beskrivas som en vektor. Vid en bestämd tidpunkt ritas man en ögonblicksbild av spänningen för varje fas som en vektor i det komplexa talplanet, enligt figur 2.2.



Figur 2.2, ett balanserat trefassystem.

Tillståndet i ett trefassystem kan i varje ögonblick beskrivas som summan av en plusföljd, minusföljd och nollföljd: U^+ , U^- och U^0 . Dessa är de symmetriska komponenterna. Plusföljden motsvarar den balanserade spänningen i ett trefassystem. Minusföljden beskriver den obalanserade spänningen i systemet. Nollföljden är medelvärdet av fasvektorerna.

Obalans definieras som

$$\frac{\|U^-\|}{\|U^+\|} \quad (2.1)$$

Om systemet utåt sett är i balans är minus- och nollföljden båda lika med noll. Nollskild minusföljd fås då systemet är i obalans och kan tolkas så att det finns en ineffektivitet i systemet. En nollskild nollföljd indikerar en anslutning till jord och mängden ström som går via jord.

För att enklare beskriva formlerna som gäller för symmetriska komponenter så definieras operatorm a (rotation av ett komplext tal 120°) som

$$a = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3} = 1e^{j120^\circ} \quad (2.2)$$

Spänningen i de tre faserna för ett balanserat system kan beskrivas komplext utifrån effektivvärdet E av spänningen som

$$U_a = E, \quad U_b = a^2E, \quad U_c = aE \quad (2.3)$$

De kan också i varje ögonblick uttryckas i symmetriska komponenter som

$$\begin{aligned} U_a &= U^0 + U^+ + U^- \\ U_b &= U^0 + a^2U^+ + aU^- \\ U_c &= U^0 + aU^+ + a^2U^- \end{aligned} \quad (2.4)$$

Det går även att uttrycka de symmetriska komponenterna i vågformens faser som

$$\begin{aligned} U^0 &= \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \\ U^+ &= \frac{1}{3}(U_a + aU_b + a^2U_c) \\ U^- &= \frac{1}{3}(U_a + a^2U_b + aU_c) \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.3.2 Klassificering med symmetriska komponenter

För att beskriva dippar används den karakteristiska spänningen V och PN-faktorn F , som beräknas ur datamängden. [15] Som vi kommer att se så kan parametrarna användas för att beräkna en klassificering T . Värdet på spänningen för faserna under en spänningsdipp kan beskrivas med hjälp av V och F . Exempelvis så kan, då dippen inträffar i fas a (betecknas som typ Da), spänningen beskrivas som

$$\begin{aligned} U_a &= V \\ U_b &= -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jF\sqrt{3} \\ U_c &= -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jF\sqrt{3} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Parametrarna V och F kan på samma sätt beräknas med hjälp av formlerna (2.4) och (2.5) och sammanfattas i Tabell 2.1, för alla dipptyper. Exempelvis beräknas uttrycket för V vid en dipp av typ Da som

$$U^+ + U^- = \frac{1}{3}(U_a + aU_b + a^2U_c) + \frac{1}{3}(U_a + a^2U_b + aU_c) =$$

$$\frac{1}{3}(2U_a + (U_b + U_c)(a + a^2)) = \frac{1}{3}(2V + (-V)(a + a^2)) = \frac{1}{3}V(2 - a - a^2) = V.$$

Tabell 2.1, uttryck för parametrarna V och F för olika dipptyper

Dipptyp	T	Påverkade faser	Karakteristisk spänning, V	PN-faktor, F
Ca	0	bc	$U^+ - U^-$	$U^+ + U^-$
Cb	2	ac	$U^+ - a^2U^-$	$U^+ + a^2U^-$
Cc	4	ab	$U^+ - aU^-$	$U^+ + aU^-$
Da	3	a	$U^+ + U^-$	$U^+ - U^-$
Db	5	bb	$U^+ + a^2U^-$	$U^+ - a^2U^-$
Dc	1	cc	$U^+ + aU^-$	$U^+ - aU^-$

Slutligen beräknas parametern T och allmänna uttryck för V och F . Tabell 2.1 visar vilka dipptyper värden på T motsvarar. Klassificering med symmetriska komponenter är definierad för en eller två påverkade faser.

$$b = -a^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad , \quad (2.7)$$

$$V = U^+ - b^{6-T}U^- \quad , \quad F = U^+ + b^{6-T}U^- \quad (2.8)$$

$$T = \frac{1}{60^\circ} \arg\left(\frac{U^-}{1 - U^+}\right) \quad (2.9)$$

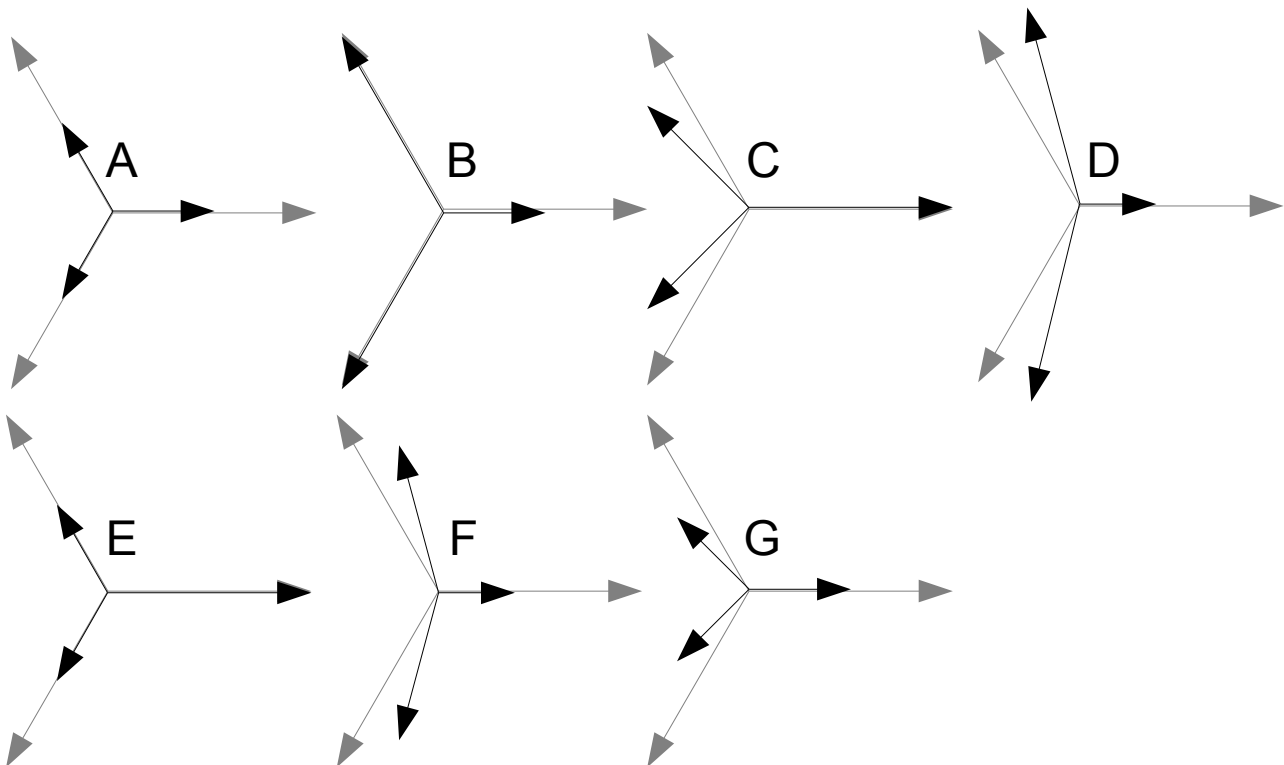
2.4 ABC-klassificeringen

ABC-metoden skiljer mellan sju typer av spänningsdippar, betecknade med bokstäverna A till G. Spänningen före dippen betecknas med E_1 och spänningen i de påverkade faserna med V^* . Senare kommer vi att se hur Symmetriska komponent-metoden förhåller sig till denna. Metoden kommer att härledas i nästa kapitel genom att analysera transformatorers effekter på fel.

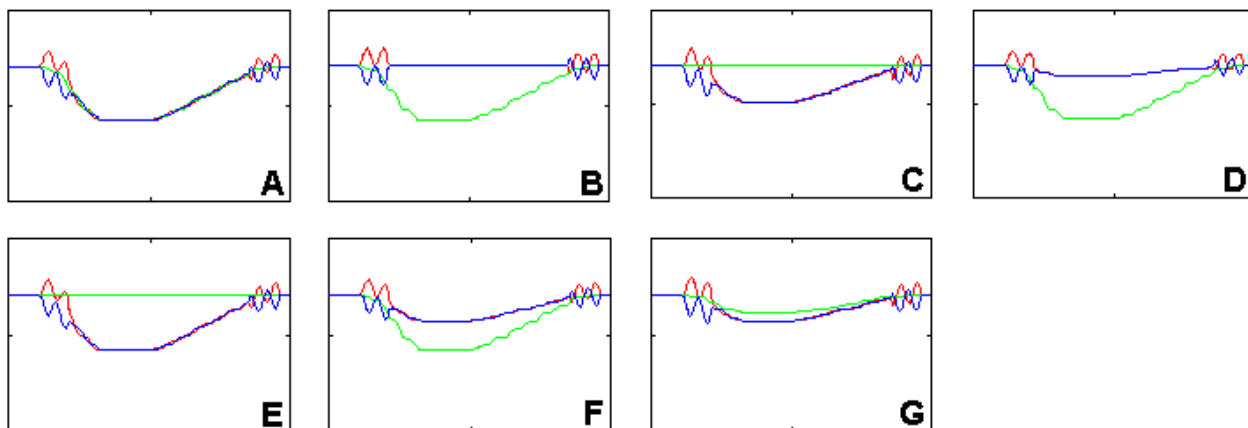
För varje dipptyp beskrivs spänningen i de tre faserna med ekvationer enligt nedan. Figur 2.3 illustrerar dipparna med fasvektorer och figur 2.4 visar effektivvärdet.

$$\begin{array}{l} U_a = V^* \\ \text{A: } U_b = -\frac{1}{2}V^* - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3} \\ U_c = -\frac{1}{2}V^* + \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3} \end{array} \quad , \quad \begin{array}{l} U_a = V^* \\ \text{B: } U_b = -\frac{1}{2}E_1 - \frac{1}{2}jE_1\sqrt{3} \\ U_c = -\frac{1}{2}E_1 + \frac{1}{2}jE_1\sqrt{3} \end{array} \quad (2.10 \text{ A-G})$$

$$\begin{array}{l}
 U_a = E_1 \\
 \text{C: } U_b = -\frac{1}{2}E_1 - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}, \text{ D: } U_b = -\frac{1}{2}V^* - \frac{1}{2}jE_1\sqrt{3} \\
 U_c = -\frac{1}{2}E_1 + \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3} \quad U_c = -\frac{1}{2}V^* + \frac{1}{2}jE_1\sqrt{3} \\
 \\
 U_a = E_1 \\
 \text{E: } U_b = -\frac{1}{2}V^* - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}, \text{ F: } U_b = -\frac{1}{2}V^* - (\frac{1}{3}E_1 + \frac{1}{6}V^*)j\sqrt{3} \\
 U_c = -\frac{1}{2}V^* + \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3} \quad U_c = -\frac{1}{2}V^* + (\frac{1}{3}E_1 + \frac{1}{6}V^*)j\sqrt{3} \\
 \\
 U_a = \frac{2}{3}E_1 + \frac{1}{3}V^* \\
 \text{G: } U_b = -(\frac{1}{3}E_1 + \frac{1}{6}V^*) - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3} \\
 U_c = -(\frac{1}{3}E_1 + \frac{1}{6}V^*) + \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}
 \end{array}$$



Figur 2.3, dipptyperna A-G illustrerade med fasvektorer.



Figur 2.4, effektivvärdet i tre faser för dipptyperna A till G.

Trefasfel karakteriseras som typ A. Vid trefasfel går spänningen ner lika mycket i alla faserna.

Vid tvåfasfel drabbas båda felfaserna av en spänningsminskning och en ändrad fasvinkel. Det är fel i två faser och kan vara mellan faserna eller till jord. De betecknas av klasserna E till G.

Vid ett fel i en fas går den påverkade fasen ner. De andra faserna kan visa en ökning eller minskning av spänningen eller ingen förändring alls, beroende på nätets egenskaper. Typerna B till D betecknar fel i en fas.

2.4.1 Propagering av dippar genom transformatorer

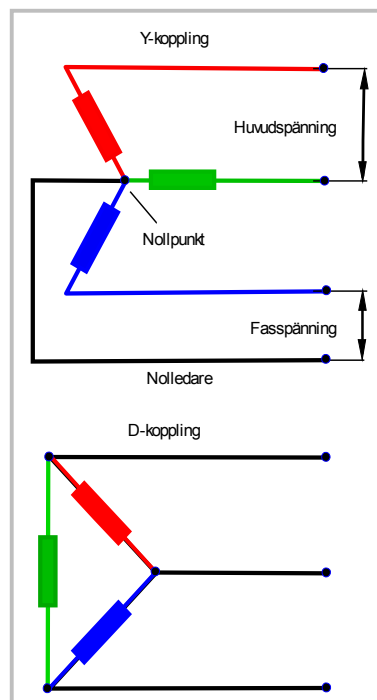
2.4.1.1 Introduktion

En dipp som uppkommit och som propagerar genom en transformator påverkas genom att plus- och minusföljdens spänningar roteras [16]; plusföljden en heltalsmultipel av 30° och minusföljden en heltalsmultipel av 60° . Multipeln kan vara noll.

För att beskriva en transformators effekt på spänningsdippar används tre kategorier:

- T1. transformatorer som inte ändrar spänningen. Detta gäller för transformatorer som är stjärn-stjärn-kopplade (Yy) och jordade i båda stjärnpunkterna.
- T2. transformatorer som tar bort nollföljdsspänningen. Exempel på dessa är stjärn-stjärnkopplade transformatorer som inte är jordade i båda ändarna, delta-delta koppling (Dd) och delta-zigzag (Dz)
- T3. transformatorer som byter linje- och fasspänningarna. Exempel är kopplingar enligt delta-stjärn (Dy), stjärn-delta (Yd) och stjärn-zigzag (Yz).

Stjärn/Y-koppling och delta/ Δ -koppling illustreras i figur 2.5.



Figur 2.5, grundläggande transformatorkopplingar

Vi kommer nu att gå igenom olika typer av fel. De härleds i [16]. Med *enfas till jord* avses att spänningen går ner i ett antal faser för att gå till jord. Ett *fas- till fasfel* innebär att två faser blir sammankopplade.

2.4.1.2 Feltyp: enfas till jord och fas- till fas

Genom att resonera kring kategorierna ovan kan fem typer av fel i en eller två faser identifieras beroende på hur systemet är kopplat och om det inträffar bakom en transformator, enligt tabell 2.2. De introduceras som X1-X5. Om någon av dessa feltyper sedan passerar genom ytterligare en transformator förändras den i enlighet med tabell 2.3.

Tabell 2.2, uppkomst av fel i en eller två faser utifrån olika förutsättningar

Feltyp och lastkoppling	T ₁	T ₂	T ₃
Enfas till jord, stjärnkopplad last	X1	X3	X2
Enfas till jord, deltakopplad last	X2	X2	X3
Fas- till fas-fel, stjärnkopplad last	X4	X4	X5
Fas- till fas-fel, deltakopplad last	X5	X5	X4

Tabell 2.3, transformatorns effekt på spänningsdippar

Dipptyp	Transformortyp		
	T ₁	T ₂	T ₃
X1	X1	X3	X2
X2	X2	X2	X3
X3	X3	X3	X2
X4	X4	X4	X5
X5	X5	X5	X4

Det enda som skiljer dipptyp X4 och X2 är en skillnad i dippens djup eller kvarvarande spänning och de kan därför beskrivas som samma typ. Likaså kan X5 och X3 reduceras till en typ. Kvar finns typerna X1, X4 och X5. De motsvarar B, C och D respektive, enligt symmetriska komponentklassificeringen.

2.4.1.3 Feltyp: tvåfas till jord

Tvåfasfel är ovanliga, men kan analyseras på samma sätt som ovan. Man finner genom ett liknande resonemang tre dipptyper som inte kan beskrivas utifrån de tidigare och de motsvarar E, F och G.

2.4.1.4 Feltyp: trefas

Vi betecknar ett fel i tre faser med A.

2.4.1.5 Sammanfattning

Från de transformatorer som används kan totalt sju dipptyper härledas, som betecknas med A till G. De definieras i (2.10 A-G). Tabell 2.5 visar hur dessa påverkas då de passerar en av våra tre transformatorklasser. Tabell 2.4 sammanfattar hur olika dipptyper uppkommer. Notera att dipptyp G inte kan uppkomma direkt utan måste produceras efter transformation av en transformator. Figur 2.3 och 2.4 illustrerar de olika dipptyperna grafiskt.

Tabell 2.4, uppkomst av dippar baserat på koppling

Feltyp	Stjärnkopplad last	Deltakopplad last
Trefas	Typ A	Typ A
Tvåfas till jord	Typ E	Typ F
Fas-till-fas	Typ C	Typ D
Enfas till jord	Typ B	Typ C (magnituden ändras)

Tabell 2.5; överföring av dippar
* magnituden ändras

Dipptyp \ Koppling	T ₁	T ₂	T ₃
Dipptyp A	A	A	A
Dipptyp B	B	D*	C*
Dipptyp C	C	C	D
Dipptyp D	D	D	C
Dipptyp E	E	G	F
Dipptyp F	F	F	G
Dipptyp G	G	G	F

2.4.1.6 Exempel

I ett trefassystem där lasten är deltakopplad inträffar ett fas-till-fas fel. Den dipp som blir resultatet kommer i ABC-systemet att vara av typen D, enligt tabell 2.4. Nätet är anslutet till en transformator av typen Yd (stjärn-deltakopplad, d.v.s. typ T₃) för att transformera ner spänningen. När dippen gått igenom transformatorn kommer utrustningen att uppleva den som en dipp av typ C, enligt tabell 2.5.

2.5 Jämförelse med ABC-metoden

Symmetriska komponent-metoden är systematisk och täcker alla möjliga utfall utom trefasfel. Den leder till en enkel algoritm för att ta reda på dipptyp och karakteristika från vågformsdata.

ABC-metoden är enklare och är lättare att förstå grafiskt vid propagering av dippar genom transformatorer. Metoden ska ses som ett specialfall av den mer generella symmetriska komponent-metoden.

I resten av rapporten kommer beteckningen "Ca/A" användas om en dipp, där den första beteckningen är enligt symmetriska komponent-metoden och den andra enligt ABC-metoden.

Sambandet mellan dipptyper vid klassificering med ABC- och symmetriska komponent-metoden beskrivs i tabell 2.6. [17]

Tabell 2.6, Samband mellan klassificering m.h.a. ABC- eller symmetriska komponent-metoden.
 E_1 är spänningen före dippen och V^* är kvarvarande spänning.

Dipptyp enligt ABC	Klassificering enligt symmetriska komponent-metoden			
	Typ	Karakt. spänning V	PN-faktor F	Nollföljdsspänning
A	<i>alla</i>	V^*	V^*	0
B	Dx	$\frac{1}{3}E_1 + \frac{2}{3}V^*$	E_1	$\frac{1}{3}V^* - \frac{1}{3}E_1$
C	Cx	V^*	E_1	0
D	Dx	V^*	E_1	0
E	Cx	V^*	$\frac{2}{3}E_1 + \frac{1}{3}V^*$	$\frac{1}{3}E_1 - \frac{1}{3}V^*$
F	Dx	V^*	$\frac{2}{3}E_1 + \frac{1}{3}V^*$	0
G	Cx	V^*	$\frac{2}{3}E_1 + \frac{1}{3}V^*$	0

3 Algoritmer

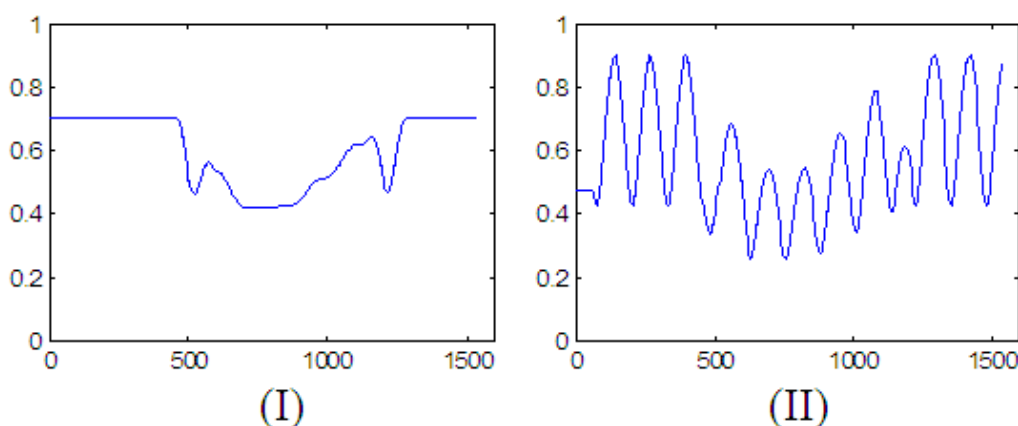
3.1 Klassificering med symmetriska komponenter

3.1.1 Effektivvärde

Effektivvärdet beräknas som kvadratisk medelvärde (eng. *RMS*, *root mean square*) för respektive fas genom

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (3.1)$$

Antalet sampel motsvaras av N , som är antalet sampel under ett helt antal halvcykler. Ett mindre beräkningsfönster än en halvcykel är inte användbart, eftersom det kommer att ge upphov till osäkerhet då symmetrin går förlorad. Figur 3.1 visar en effektivvärdesberäkning med en halv- (I) respektive en kvartscykel som beräkningsfönster för en fas som upplever en dipp. Dippen uppträder ungefär mellan index 500 och 1300.



Figur 3.1, effektivvärde för en fas som genomgår en dipp, där beräkningsfönstret utgjorts av en halvcykel (I) respektive en kvartscykel (II).

3.1.2 Synkroniserad signal och komplexa spänningar

För att använda algoritmen för klassificering är det nödvändigt att ha en signal som är synkroniserad med vågformens frekvens. I mitt arbete har jag haft tillgång till synkroniserad data såväl som till osynkroniserad. Man kan härleda uttryck för de symmetriska komponenterna ur en synkron signal.

Antag först att $v(t)$ är en synkroniserad signal. Den kan beskrivas som

$$v(t) = \sqrt{2} X \cos(2\pi f t) - \sqrt{2} Y \sin(2\pi f t) = \Re[\sqrt{2}(X + jY)e^{j2\pi f t}] \quad (3.2)$$

Vi bildar v_d och v_q som

$$\begin{aligned}v_d(t) &= \sqrt{2} v(t) \times \cos(2\pi f t) = X + X \cos(2\pi f t) + Y \sin(2\pi f t) \\v_q(t) &= \sqrt{2} v(t) \times \sin(2\pi f t) = -Y + Y \cos(2\pi f t) + X \sin(2\pi f t)\end{aligned}\quad (3.3)$$

Om vi sedan tar medelvärdet över en halvperiod får vi följande uttryck för den komplexa spänningen. (Ofta är det istället mera praktiskt att ta medelvärdet över en hel period, för att minska känsligheten för störningar.)

$$X(t) + jY(t) = \overline{v_d(t)} - \overline{v_q(t)} \quad (3.4)$$

Den komplexa spänningen kan nu beräknas, här med fas a som referens, som

$$\begin{aligned}\underline{V}_a(t) &= \frac{X_a(t) + jY_a(t)}{X_a(0) + jY_a(0)} \\ \underline{V}_b(t) &= \frac{X_b(t) + jY_b(t)}{X_a(0) + jY_a(0)} \\ \underline{V}_c(t) &= \frac{X_c(t) + jY_c(t)}{X_a(0) + jY_a(0)}\end{aligned}\quad (3.5)$$

De symmetriska komponenterna beräknas med

$$\begin{aligned}U^+ = \underline{V}_1(t) &= \frac{1}{3} [\underline{V}_a(t) + a \underline{V}_b(t) + a^2 \underline{V}_c(t)] \\ U^- = \underline{V}_2(t) &= \frac{1}{3} [\underline{V}_a(t) + a^2 \underline{V}_b(t) + a \underline{V}_c(t)] \\ U^0 = \underline{V}_0(t) &= \frac{1}{3} [\underline{V}_a(t) + \underline{V}_b(t) + \underline{V}_c(t)]\end{aligned}\quad (3.6)$$

Slutligen så kan vi klassificera dippen enligt beskrivningen i kapitel 2.3.2.

4 Fallstudier

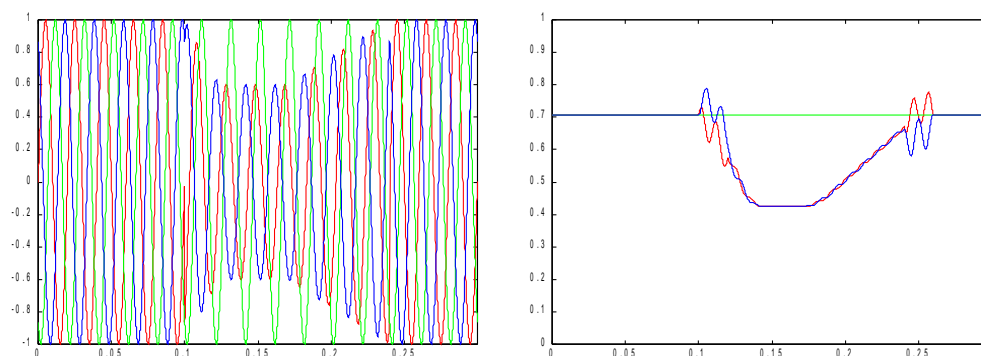
4.1 Inledning

En algoritm som använder symmetriska komponenter för att klassificera dippar beskrivs i [18], som har implementerats. För att testa implementationen har några testfall studerats. Först genererades syntetiska dippar för att kontrollera att algoritmen räknade rätt. Sedan analyserades några mätningar som innehåller oklassificerade dippar.

4.2 Fall 1, syntetisk dipp av typ Cb

4.2.1 Specifikationer

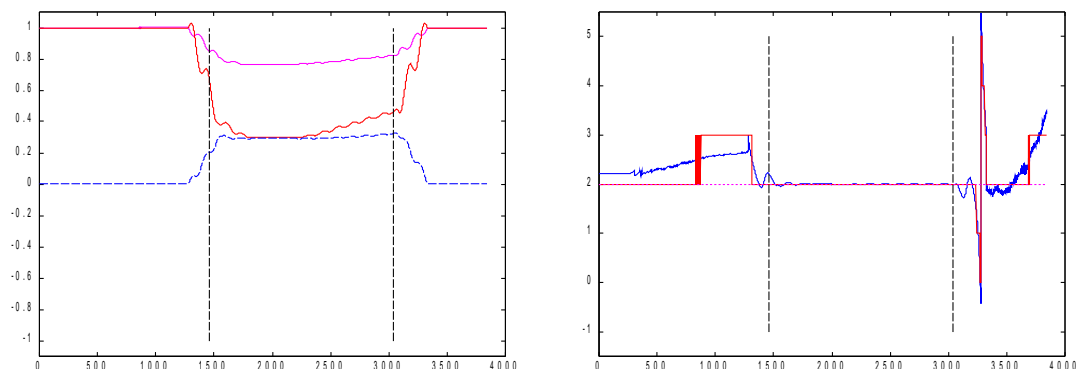
Vågformsdata med 256 sampel per period över 15 perioder genererades, med en dipp av typ Cb mellan period 5 till 12. Data är 300 ms och dippens längd ca 140 ms. Figur 4.1 visar vågformsdata och effektivvärdet.



Figur 4.1, vågformsdata (t.v.) och beräknade effektivvärdet (t.h.) för fall 1. Den vågräta skalan är i sekunder. Rött, grönt och blått motsvarar de tre faserna a,b,c i den ordningen.

4.2.2 Resultat

Algoritmen klassificerar dippen som typ E/Cb. Klass E enligt ABC-klassificeringen innebär nedgång i två faser, vilket stämmer överens med figur 4.1 (t.h.). Figur 4.2 (t.h.) visar att värdet på T är stabilt.

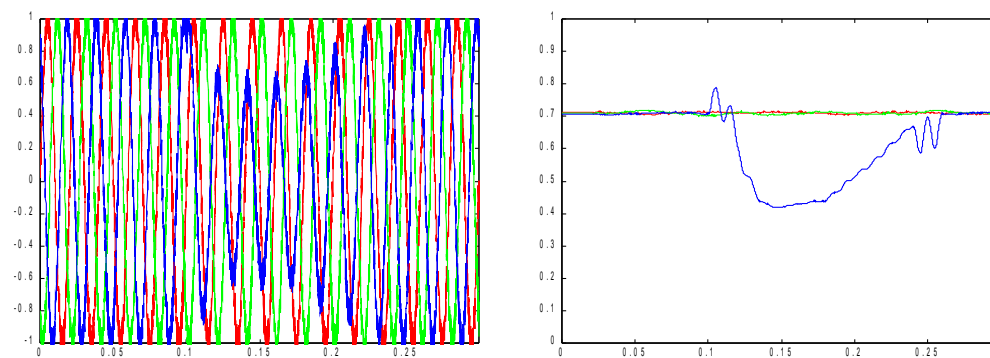


Figur 4.2. T.v. karakteristisk spänning (röd), PN-faktor (lila) och beloppet av nollföljdsspänningen (streckad blå). T.h. klassificeringsfunktionen (blå) och densamma avrundad (röd, streckad för den dominerande klassen). Vertikala streckade linjer markerar var dippen börjar och slutar.

4.3 Fall 2, syntetisk dipp av typ Dc med uniformt brus

4.3.1 Specifikationer

Vågformsdata med 256 sampel per period över 15 perioder genererades, med en dipp av typ Dc mellan period 5 till 12. Data är 300 ms och dippens längd ca 140 ms. Till data lades brus, en uniform stokastisk signal på $\pm 10\%$ av normen. Figur 4.3 visar vågformsdata och effektivvärdet.

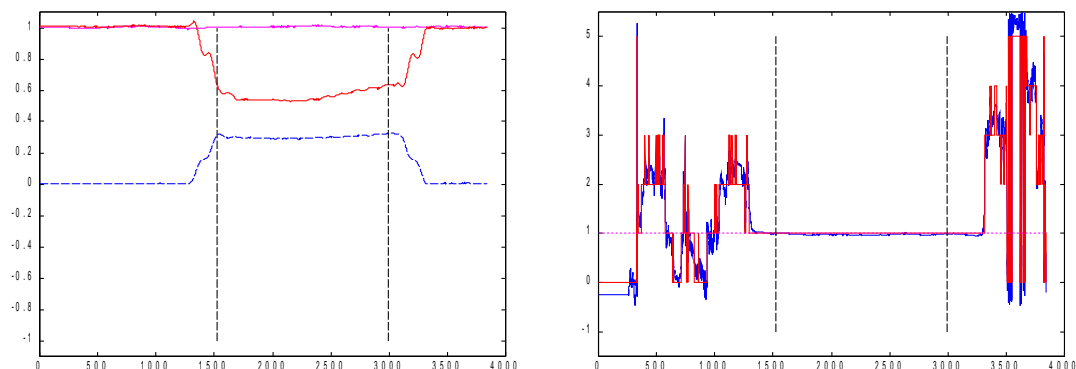


Figur 4.3, vågformsdata (t.v.) och beräknade effektivvärdet (t.h.) för fall 2. Den vågräta skalan är i sekunder. Rött, grönt och blått motsvarar de tre faserna a,b,c i den ordningen.

4.3.2 Resultat

Algoritmen klassificerar dippen först som typ $T=1$ det vill säga Dc med hjälp av symmetriska komponenter, men sedan som typ E/Cc. Dipptyp E innebär lika stor nedgång i två faser men signalen som genererats innehåller bara en nedgång i tredje fasen. Ett rimligare resultat skulle vara typ B.

I figur 4.4 t.h. ses T -funktionen under dippen vara i stort sett konstant. Bruset som infördes syns i både figur 4.3 och 4.4 men inverkar inte på resultatet.

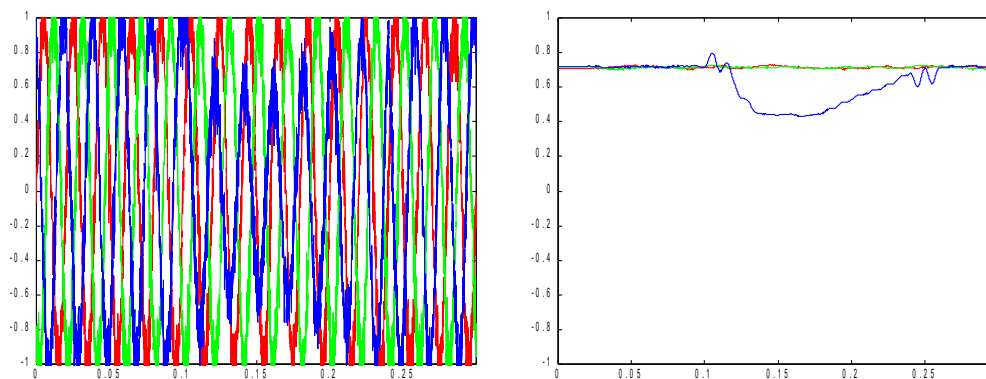


Figur 4.4. T.v. karakteristisk spänning (röd), PN-faktor (lila) och beloppet av nollföljdsspänningen (streckad blå). T.h. klassificeringsfunktionen – reell (blå) och avrundad (röd). Vertikala streckade linjer markerar var dippen börjar och slutar.

4.4 Fall 3, syntetisk dipp av typ Dc med vitt brus

4.4.1 Specifikationer

Vågformsdata med 256 sampel per period över 15 perioder genererades, med en dipp av typ Dc mellan period 5 till 12. Data är 300 ms och dippens längd ca 140 ms. Till data lades vitt brus, en normalfördelad stokastisk signal med medelvärde 0, variansen 1. För att 95% av värdena ska ligga inom $\pm 20\%$ av normen multiplicerades signalen med 0,1. Figur 4.5 visar vågformsdata och effektivvärdet.

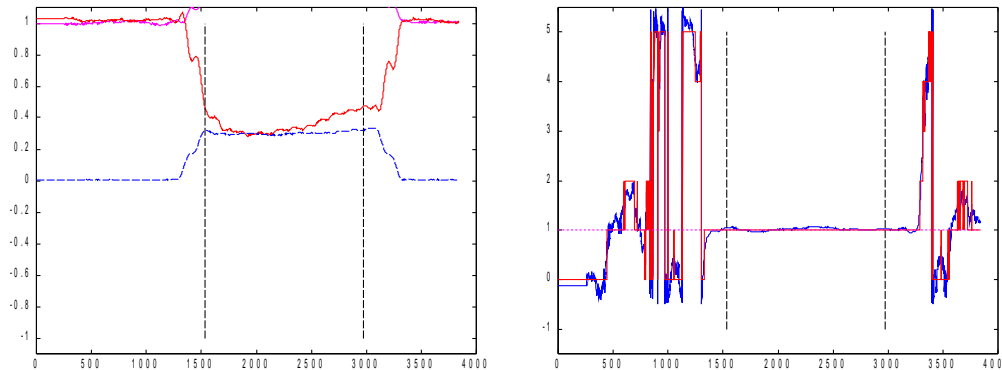


Figur 4.5, vågformsdata (t.v.) och beräknade effektivvärdet (t.h.) för fall 2. Den vågräta skalan är i sekunder. Rött, grönt och blått motsvarar de tre faserna a,b,c i den ordningen.

4.4.2 Resultat

Algoritmen klassificerar dippen först som typ $T=1$ det vill säga Dc med hjälp av symmetriska komponenter, men sedan som typ E/Cc, på samma sätt som för fallstudie 2. Dipptyp E innebär lika stor nedgång i två faser men signalen som genererats innehåller bara en nedgång i tredje fasen. Ett rimligare resultat skulle vara typ B.

Skillnaden gentemot fall 2 är att bruset nu är normalfördelat, vilket är en fysikaliskt bättre modell. Den största skillnaden mellan fallen syns i figur 4.4 och 4.6 t.v. där den karakteristiska spänningen och PN-faktorn avviker mer från resultatet utan brus än resultatet med uniformt brus. Trots detta påverkas inte T -funktionen under dippen tillräckligt för att störa resultatet.

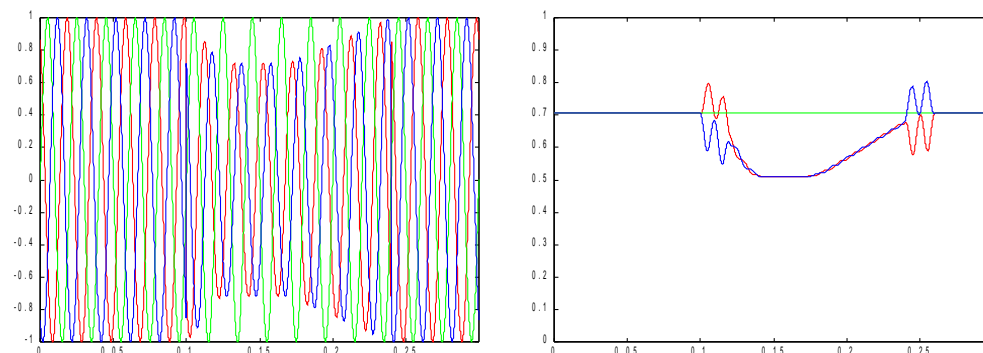


Figur 4.6. T.v. karakteristisk spänning (röd), PN-faktor (lila) och beloppet av nollföljdsspänningen (streckad blå). T.h. klassificeringsfunktionen – reell (blå) och avrundad (röd). Vertikala streckade linjer markerar var dippen börjar och slutar.

4.5 Fall 4, syntetisk dipp av typ C

4.5.1 Specifikationer

Vågrätsdata med 256 sampel per period över 15 perioder genererades, med en dipp av typ C (enligt ABC-klassificeringen) mellan period 5 till 12 där andra fasen är opåverkad. Data är 300 ms och dippens längd ca 140 ms. Figur 4.7 visar vågrätsdata och effektivvärdet.

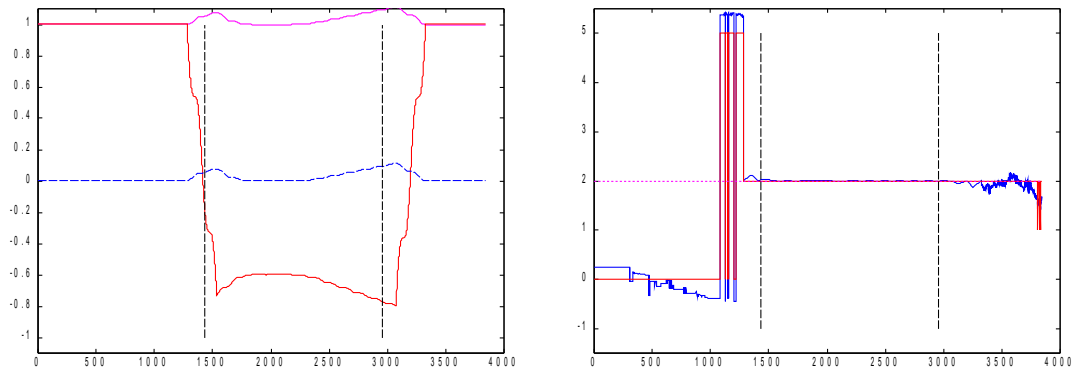


Figur 4.7, vågrätsdata (t.v.) och beräknade effektivvärdet (t.h.) för fall 3. Den vågräts skalan är i sekunder. Rött, grönt och blått motsvarar de tre faserna a,b,c i den ordningen.

4.5.2 Resultat

Figur 4.8 t.h. visar att T -funktionen under dippen är i stort sett konstant. Algoritmen klassificerar dippen som typ Cb. Det innebär nedgång i fas ett och tre, vilket stämmer med figur 4.7 och

specifikationen.

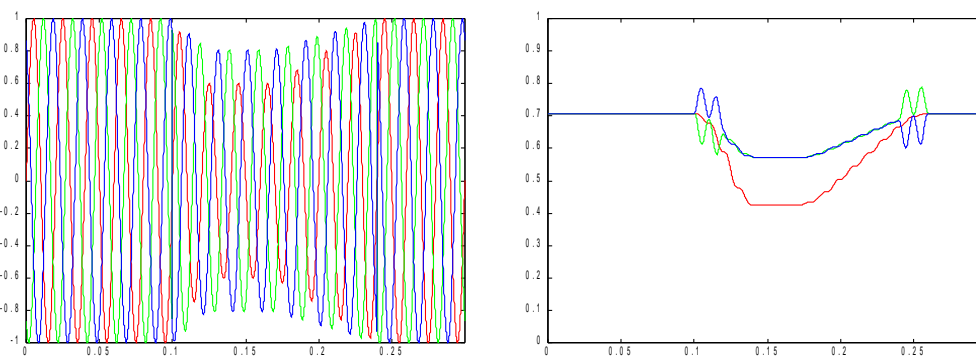


Figur 4.8. T.v. karakteristisk spänning (röd), PN-faktor (lila) och beloppet av nollföljdsspänningen (streckad blå). T.h. klassificeringsfunktionen – reell (blå) och avrundad (röd). Vertikala streckade linjer markerar var dippen börjar och slutar.

4.6 Fall 5, syntetisk dipp av typ F

4.6.1 Specifikationer

Vågformsdata med 256 sampel per period över 15 perioder genererades, med en dipp av typ F (enligt ABC-klassificeringen) mellan period 5 till 12 där den första fasen är den som minskar mest. Data är 300 ms och dippens längd ca 140 ms. Figur 4.9 visar vågformsdata och effektivvärdet. Vi ser att alla faser går ner, men att första faser (röd) går ner mest.

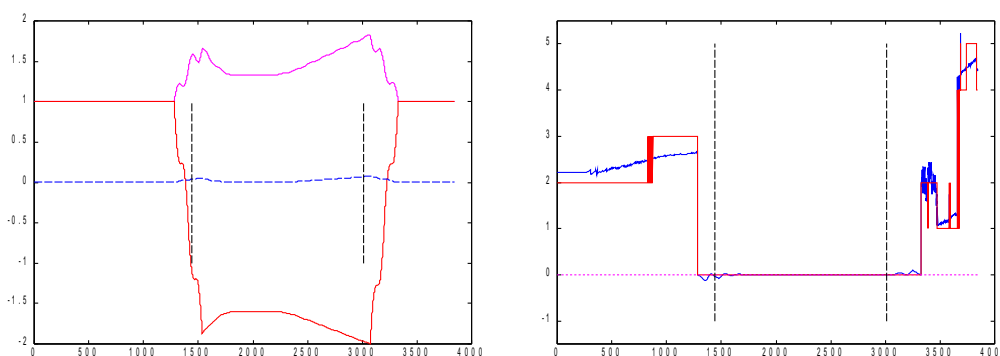


Figur 4.9, vågformsdata (t.v.) och beräknade effektivvärdet (t.h.) för fall 4. Den vågräta skalan är i sekunder. Rött, grönt och blått motsvarar de tre faserna a,b,c i den ordningen.

4.6.2 Resultat

Figur 4.10 t.h. visar att T -funktionen under dippen är i stort sett konstant. Algoritmen klassificerar dippen som typ Ca, dvs en nedgång i fas två och tre. Eftersom spänningen går ner i tre faser är det inte intuitivt uppenbart vilken klass i symmetriska komponentsystemet som ska användas. Då fas ett går ner mest kan vi tänka oss klass Da eller möjligen Cb/Cc. Klassificeringen som typ Ca lurar oss

att fas ett inte går ner alls, när det i själva verket är den som upplever störst spenningsfall.

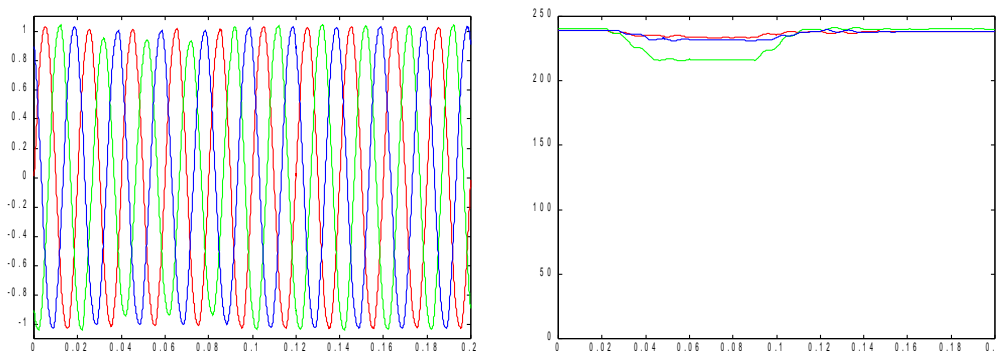


Figur 4.10. T.v. karakteristisk spänning (röd), PN-faktor (lila) och beloppet av nollföljdsspänningen (streckad blå). T.h. klassificeringsfunktionen – reell (blå) och avrundad (röd). Vertikala streckade linjer markerar var dippen börjar och slutar.

4.7 Fall 6, mätdata 1

4.7.1 Specifikationer

Synkroniserad vågformsdata uppmätt av Metrum Sweden AB, samplad med 256 sampel per period över 10 perioder. Data är 200 ms. Figur 4.11 visar vågformsdata och effektivvärdet.

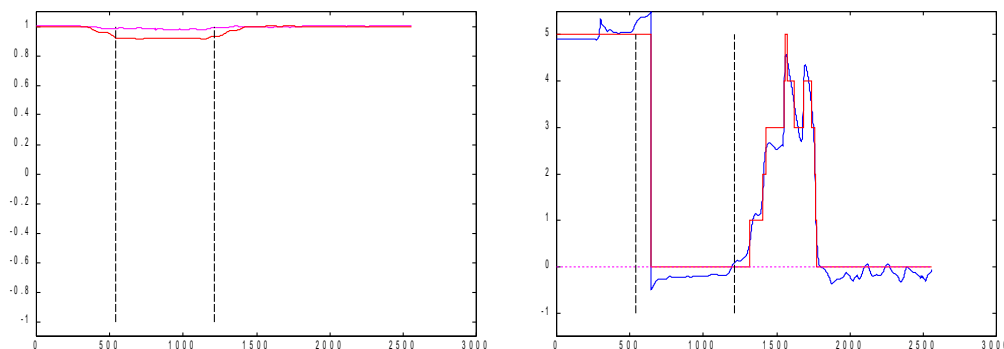


Figur 4.11, vågformsdata (t.v.) och beräknade effektivvärdet (t.h.) för fall 5. Den vågräta skalan är i sekunder. Rött, grönt och blått motsvarar de tre faserna a,b,c i den ordningen.

4.7.2 Resultat

Algoritmen klassificerar dippen som typ Ca/A. Effektivvärdets minsta värde är strax under 93% av normen. Algoritmen klassificerar bara värden som går under gränsvärdet 90% så i det här fallet har det justerats till 95%. I figur 4.12 ser vi att klassificeringsfunktionen går från 5 till 0 i intervallet. $T=5$ motsvarar en dipp av typ Db, en nedgång i fas b. $T=0$ motsvarar Ca, nedgång i fas b och c, och är den dominerande typen. Av effektivvärdet ser man att det är fas b som går ner mest och

följaktligen borde $T=5$ dominera. Men $T=0$ är närliggande och dippen understiger inte 90% av normen, vilket torde försämra noggrannheten. Dessutom finns en tendens till att alla faserna går ner. En sådan dipp kan klassificeras på flera olika sätt enligt symmetriska komponenter- och ABC-metoden respektive.

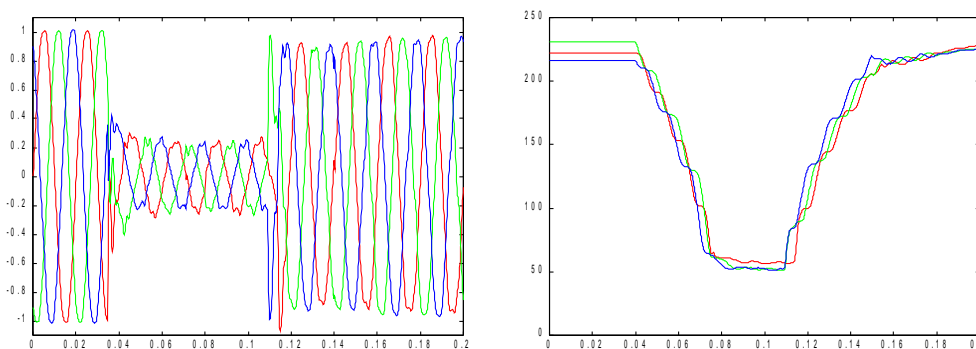


Figur 4.12. T.v. karakteristisk spänning (röd), PN-faktor (lila) och beloppet av nollföljdsspänningen (streckad blå). T.h. klassificeringsfunktionen – reell (blå) och avrundad (röd). Vertikala streckade linjer markerar var dippen börjar och slutar.

4.8 Fall 7, mätdata 2

4.8.1 Specifikationer

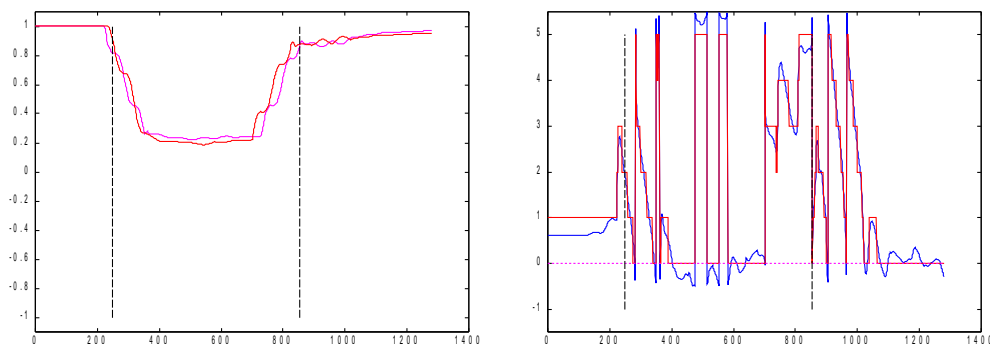
Synkroniserad vågformsdata uppmätt av Metrum Sweden AB, samplad med 128 sampel per period över 10 perioder. Data är 200 ms. Figur 4.13 visar vågformsdata och effektivvärdet.



Figur 4.13, vågformsdata (t.v.) och beräknade effektivvärdet (t.h.) för fall 6. Den vågräta skalan är i sekunder. Rött, grönt och blått motsvarar de tre faserna a,b,c i den ordningen.

4.8.2 Resultat

Algoritmen klassificerar dippen som typ Ca/A. Eftersom effektivvärdet går ner i alla tre faserna samtidigt är det en tydlig dipp A enligt ABC-metoden. Symmetriska komponent-metoden har ingen klassificering för trefasfel så därför finns inget förväntat resultat.

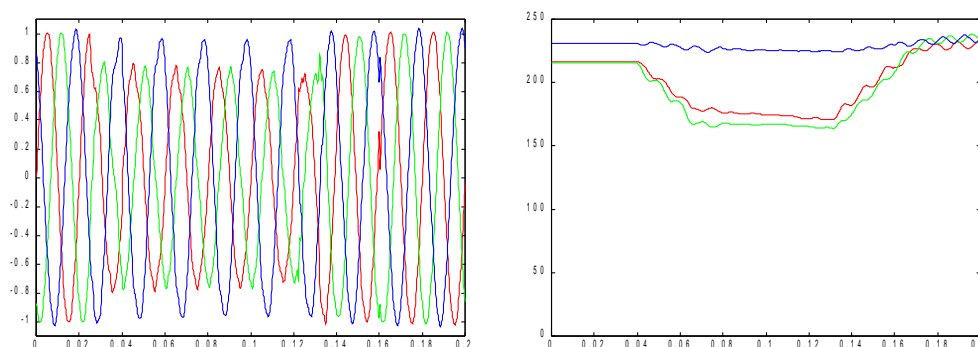


Figur 4.14. T.v. karakteristisk spänning (röd), PN-faktor (lila) och beloppet av nollföljdsspänningen (streckad blå). T.h. klassificeringsfunktionen – reell (blå) och avrundad (röd). Vertikala streckade linjer markerar var dippen börjar och slutar.

4.9 Fall 8, mätdata 3

4.9.1 Specifikationer

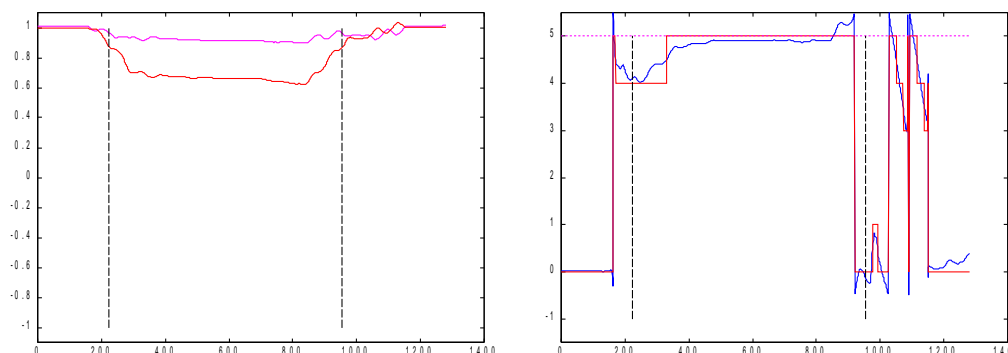
Synkroniserad vågformsdata uppmätt av Metrum Sweden AB, samplad med 128 sampel per period över 10 perioder. Data är 200 ms. Figur 4.15 visar vågformsdata och effektivvärdet. I effektivvärdesgrafen syns ett annat elkvalitetsproblem: obalans, som innebär att spänningarna inte är balanserade utan att det tas ut olika mycket ström från de olika faserna. Det syns på att fas tre initialt ligger högre än de andra faserna.



Figur 4.15, vågformsdata (t.v.) och beräknade effektivvärdet (t.h.) för fall 6. Den vågräta skalan är i sekunder. Rött, grönt och blått motsvarar de tre faserna a,b,c i den ordningen.

4.9.2 Resultat

Algoritmen klassificerar dippen som typ Db/F. På effektivvärdet ser vi att spänningen går ner i fas a och b samtidigt. Det motsvarar dipp Cc med $T=4$. Dipp Db (nedgång i fas b) motsvaras av $T=5$. Vi ser att klassificeringsfunktionen först ger $T=4$ i dippintervallet. Det värde som dominerar avrundas till $T=5$ från ett värde mellan 4 och 5. Det kan diskuteras vad ett värde på T mittemellan två klasser egentligen innebär. Kanske är klassificeringen för osäker för att kunna göra en klar distinktion mellan två möjliga klasser.



Figur 4.16. T.v. karakteristisk spänning (röd), PN-faktor (lila) och beloppet av nollföljdsspänningen (streckad blå). T.h. klassificeringsfunktionen – reell (blå) och avrundad (röd). Vertikala streckade linjer markerar var dippen börjar och slutar.

4.10 Utvärdering av metoden

4.10.1 Introduktion

För att testa implementationen behöver vi köra den på ett antal olika mätdata. För att utröna hur bra en algoritm är behöver vi studera om det finns begränsningar i den teoretiska modellen eller i beräkningarna.

4.10.2 Teoretiska begränsningar

Den centrala frågeställningen är: går det att konstruera en algoritm enligt symmetriska komponent-metoden som identifierar 100% korrekt? Det har visats [19] att två dippar med olika värden på den karakteristiska spänningen V och PN-faktorn F kan ge samma värden på fasspänningarnas amplitud och fasvinkel. Genom erfarenhet av att arbeta med dippar kan man avgöra vilken av två möjliga klasser som är den riktiga genom att undersöka PN-faktorns amplitud och den karakteristiska spänningens fasvinkel.

4.10.3 Testning

4.10.3.1 Syntetiska dippar

För syntetiska dippar har en uttömmande testning gjorts, både på dippar genererade enligt ABC- och symmetriska komponent-metoden. Fokus har legat på symmetriska komponenter och tester har visat att algoritmen identifierar dem tillfredsställande. För dippar enligt ABC-metoden har inte resultatet varit sämre vilket illustreras av testfall 4 ovan.

4.10.3.2 Mätdata

På grund av dålig tillgång till mätdata med lämpliga dippar har inte någon uttömmande testning kunnat genomföras. Mätdata har innehållit dippar där effektivvärdet inte underskrider 90% av det nominella värdet och dippar som underskrider 10% vilka istället registrerats som avbrott. Dipparna har varit svåra att kategorisera och tenderat att ändra karaktär.

5 Resultat

5.1 Metod

Från början låg fokus för exjobbet på att studera dippar. Först genomfördes en litteraturstudie. Mycket tid ägnades åt att leta efter vetenskapliga artiklar. Parallellt började en algoritm som fanns beskriven i litteraturen att implementeras. Under processen användes konstruerade signaler för att testa implementeringen. Algoritmen utvecklades och testades iterativt.

Ett stort problem som tog mycket tid i anspråk var att konstruera en signal av osynkroniserad mätdata som var synkroniserad med den verkliga signalen. Efter ett tag byttes metod till att använda synkroniserad mätdata, på grund av svårigheter att implementera steget i algoritmen. Nästa steg var att förstå och felsöka algoritmen. Den består av många uträkningar i sekvens och ett fel i resultatet kunde bero på många orsaker.

5.2 Utvärdering av fallstudie

Fall 1 och 2 var syntetiska dippar enligt symmetriska komponent-metoden. Båda identifierades korrekt av algoritmen.

Fall 3 och 4 var syntetiska dippar enligt ABC-metoden. Eftersom algoritmen inte har ett fullgott stöd för klassificering enligt ABC-metoden var inte ett perfekt resultat att vänta. Den förstnämnda identifierades godtagbart, men den andra identifierades helt felaktigt.

Fall 5, 6 och 7 var utvalda mätdata ur en stor datamängd. Gemensamt är att de har en större osäkerhet jämfört med de syntetiska dipparna. Algoritmen identifierar inte fall 5 och 7 entydigt men vi ser att den rimligaste klassificeringen är tydligt representerad i grafen över klassificeringsfunktionen. Fall 6 är speciellt därför att det är ett trefasfel, som symmetriska komponent-metoden inte kan klassificera; men algoritmen identifierar den korrekt enligt ABC-metoden.

Bruset som infördes för fall 2 och 3 är högre än vad som normalt förekommer i elnätet, men påverkade trots detta inte resultatet. Fallen där brus har introducerats antyder att algoritmen är stabil: även om den karakteristiska spänningen och PN-faktorn påverkas så är klassificeringsfunktionen relativt oförändrad. Det verkar sannolikt att andra faktorer som exempelvis elnätets struktur har större inverkan på resultatet än någon form av brus.

Algoritmen förutsätter att en dipp är av en viss typ och är regelbunden under hela förloppet. Det som erfarits av mätdata är att en dipp sällan är regelbunden. Mycket beror av elnätets egenskaper i det område där mätdata samlats in. Inledningsvis i den här studien valdes att fokusera på dippar på bekostnad av andra företeelser inom elkvalitet, som i stor utsträckning kan påverka utseendet på en dipp. Till exempel så orsakar hög obalans en skillnad mellan effektivvärdena för faserna, som kan vara av samma storleksordning som gränsvärdet gentemot nominella effektivvärdet för att registrera en dipp. (Se [4] för definitioner av olika elkvalitetsföreteelser.)

5.3 Slutsats

Algoritmen som implementerats har potential att bli användbar för en grundläggande, snabb och

automatisk analys av mätdata. Den kan vara svår att få att implementera korrekt och även då finns risken för en felaktig klassificering. Ett förslag på förbättring kan vara att implementera alternativa, kompletterande analyser för att få flera infallsvinklar på samma data. Men det viktigaste algoritmen gör är att den rapporterar att det förekommer ett fel, som även om analysen inte är rätt har identifierat en störning som kan analyseras ytterligare.

5.4 Fortsatt arbete

Algoritmen har i första hand fokuserat på att implementera klassificering med symmetriska komponenter. Om ABC-metoden implementeras fullt ut kan det ge en utförligare beskrivning av dippar. Algoritmen skulle kunna kompletteras med andra metoder, exempelvis [23], [24] och [25].

En förutsättning för metoden är användandet av synkroniserad mätdata. Enligt litteraturen går det att konvertera data till synkroniserade signaler. En sådan implementering är användbar i det att den ökar mängden data som kan analyseras av algoritmen. Dock behöver den en analys av hur noggrannheten i resultatet påverkas.

Algoritmen är generell och tar ingen hänsyn till hur elnätet ser ut. Med kunskap om elnätets struktur och egenskaper i närheten av mätpunkten är det möjligt att ta reda på om felet inträffar uppströms eller nedströms [20] och göra uppskattningar av på vilket avstånd ett fel har inträffat [21], [26]. Med kännedom om vilka transformatorer som finns i nätet är det möjligt att göra grova uppskattningar av vilka typer av fel som kan ha orsakat dippen. Vid praktiska tillämpningar skulle det här vara användbart.

Den vanliga definitionen av en dipp innebär att störningen kan klassificeras i en bestämd klass. Kanske är det relevant att studera hur en dipp förändras över tid.

Won, Ahn, Chung och Kim [11] har beskrivit en ny metod för att beskriva dippar. Genom att använda parametrar som beror på utrustningen fås en praktiskt användbar metod för att se vilka dippar som påverkar utrustning. Algoritmen skulle kunna utökas med stöd för detta.

Det existerar flera tekniker för automatisk igenkänning och klassificering [2], exempelvis neurala nätverk och Support Vector Machines (SVM). Algoritmen kan utökas med dylika tekniker för att förbättra tilliten till resultatet. En annan möjlighet är att bearbeta mätdata i realtid [22] med teknikerna för att få en snabb uppfattning av vilken typ av störning som förekommer.

6 Referenser

- [1] Understanding power quality problems, Math H. J. Bollen, 2000
- [2] Signal processing of power quality disturbances, Math H. J. Bollen and Irene Y. H. Gu, 2006
- [3] STRI AB, "Vad är elkvalitet", 2005-05-15,
<http://www.stri.se/metadot/index.pl?id=6712&isa=Category&op=show>
- [4] ABB, "Elkvalitetsnyckeln", 2005-05-15,
<http://www.abb.se/cawp/seitp161/88b251bf40b62728c1256d7a003e74c5.aspx>
- [5] John Åkerlund, 2005, "Dippar och avbrott kostar miljarder", ERA nr 3/2005, sida 33,
http://www.era.se/bild/3_05_33.pdf
- [6] Metrum Sweden AB, <http://www.metrum.se>
- [7] L.D. Zhang, M.H.J. Bollen, 1998; "A Method for Characterizing Unbalanced Voltage Dips (Sags) with Symmetrical Components", IEEE Power Engineering Review, July 1998, sid 50-52
- [8] Pramod Parihar, Edwin Liu, 1998; "Identification, Classification and Correlation of Monitored Power Quality Events", Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE; Volume 1, 31 Jan-4 Feb 1999, sid 437 – 441
- [9] M.H.J. Bollen & L.D. Zhang, 2003, "Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults", Electric Power Systems Research, volume 66, pages 59-69
- [10] IEEE recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment, IEEE std.1346, 1998.
- [11] Dong-Jun Won, Seon-Ju Ahn, Il-Yop Chung, Joong-Moon Kim; 2003; "A new definition of voltage sag duration considering the voltage tolerance curve", 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference; Bologna, Italy, 2003-06-23 - 2003-06-26
- [12] Electromagnetic compatibility, IEC 61000-2-1, 1990.
- [13] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE std.1159, 1995, New York.
- [14] "Signal processing of power quality disturbances", sid 68-71.
- [15] "Signal processing of power quality disturbances", sid 461.
- [16] "Understanding power quality problems", sid 191ff.
- [17] "Signal processing of power quality disturbances", sid 471.
- [18] "Signal processing of power quality disturbances", sid 591-597.
- [19] "Signal processing of power quality disturbances", sid 608-609, figur 8.34 och 8.35.
- [20] "Signal processing of power quality disturbances", sid 635, figur 8.47.
- [21] "Understanding power quality problems", sid 204ff.

- [22] Iñigo Monedero, Carlos León, Jorge Roper, Antonio García, José Manuel Elena, Juan C. Montaño; "Classification of Electrical Disturbances in Real Time Using Neural Networks", 2007, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, july 2007
- [23] C. Sharmeela, M.R. Mohan, G.Uma, J.Baskaran, 2006, "A Novel Detection and Classification Algorithm for Power Quality Disturbances using Wavelets", American Journal of Applied Sciences 3(10): 2049-2053, 2006
- [24] Surya Santoso, W. Mack Grady, Edward J. Powers, Jeff Lamoree, Siddharth C. Bhatt, 2000, "Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, january 2000
- [25] Norman C. F. Tse, 2007, "Wavelet-Based Algorithm for Power Quality Analysis", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 24-28 juni 2007, sid 1-6
- [26] Yuan Liao, Mladen Kezunovic, 2007, "Optimal Estimate of Transmission Line Fault Location Considering Measurement Errors", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, juli 2007