

Fast Fourier Transform (FFT) i elsystemet – hvad det er og hvorfor det er nyttigt for Energinet

Hvad er FFT? En intuitiv forklaring

FFT (Fast Fourier Transform) er en metode til at omdanne et signal fra tidsdomænet til frekvensdomænet. Det vil sige, at man tager en kompliceret bølgeform (f.eks. en elektrisk spænding over tid) og **splitter den op i de rene sinusbølger**, den består af, ved forskellige frekvenser ¹. På den måde kan FFT afsløre, hvilke *frekvenskomponenter* der gemmer sig i et signal. En analogi er musik: hvis man hører en akkord, lyder det som én lyd i tid, men en Fourier-analyse kan vise de individuelle toner (frekvenser), der tilsammen udgør akkorden. Ved at dissekere signalet i frekvensindhold gør FFT det lettere for ingeniører at genkende mønstre, opdage unormale komponenter og filtrere uønsket støj ².

Kort sagt giver FFT et "spektrum" af signalet – ligesom et prisme, der deler hvidt lys i regnbuens farver. Man får et overblik over, hvor meget energi der er ved hver frekvens. Importantly, dette kan gøres **hurtigt**; FFT-algoritmen er langt mere effektiv end en naiv beregning af Fourier-transformation, hvilket muliggør anvendelse selv i (nær)realtid ³.

FFT's anvendelse i elsystemet

I elsystemet – som drives af vekselstrøm med en grundfrekvens på 50 Hz – er FFT et uundværligt værktøj for at analysere **elkvalitet og stabilitet**. Når vi måler spændinger eller strømme i nettet, forventer vi ideelt en ren sinusform ved 50 Hz. I praksis opstår der dog ofte *afvigelser* og *tillægskomponenter*: f.eks. højere harmoniske frekvenser (overtoner), interharmoniske komponenter (mellem frekvenser), eller små svingninger i frekvensen. Ved at transformere netsignaler til frekvensdomænet kan man **identificere og kvantificere disse komponenter** meget tydeligt ⁴ ⁵. FFT afslører tilstedeværelsen af harmonisk forvrængning i spænding/strøm, hvilket er kritisk for at vurdere *elkvaliteten* og overholdelse af standarder ⁶. Samtidig kan den påvise eventuelle *oscillationer* eller interharmoniske frekvenser, som kan indvirke på *systemets stabilitet* ⁵.

For en transmissionssystemoperatør som Energinet er dette vigtigt, fordi stigende kompleksitet i elsystemet (f.eks. mange nye vedvarende energikilder og effektelektroniske apparater) medfører **øget harmonisk forvrængning**, der kan påvirke både spændingskvalitet og forsyningssikkerhed ⁷. FFT giver her et middel til at overvåge og analysere disse forvrængninger. Med andre ord fungerer FFT som "X-ray briller" for elnettet: den gør usynlige frekvensforstyrrelser synlige, så man kan tage de rigtige beslutninger for at holde systemet sundt.

Specifikke anvendelser for TSO (Energinet)

Overvågning og analyse af frekvens

En kerneopgave for en TSO er at overvåge systemfrekvensen (normalt 50,00 Hz) og sikre, at den forbliver stabil. Små udsving i frekvensen sker hele tiden, men nogle gange kan der opstå **systematiske svingninger** eller afvigelser, som kræver opmærksomhed. FFT kan her bruges på frekvensmålinger (eller relaterede signaler som effektudsving) til at afsløre, om der er *bestemte*

frekvensmønstre til stede i frekvensens variation. For eksempel, hvis to områder af elsystemet “gynger” mod hinanden, kan det give en langsom oscillation (fx 0,2 Hz), som vil vise sig som en spids i frekvensspektret for netfrekvensen. FFT gør det muligt at detektere sådan en *dominerende oscillerende komponent* tydeligt ⁸. Disse data kan anvendes til at **diagnosticere resonanser i systemet** og til at indstille regulatorer som Power System Stabilizers (PSS) på kraftværker, så de dæmper de pågældende svingninger ⁸. Med andre ord kan Energinet via FFT-analyse af frekvensdata opdage begyndende ustabilitetstendenser i tide og iværksætte tiltag.

Det skal nævnes, at moderne måleudstyr (f.eks. synkronfasemålere, PMU'er) leverer detaljerede frekvensdata mange gange i sekundet. Ved at køre FFT løbende på disse data-vinduer kan man automatisk **fange frekvenshændelser** eller oscillationer, når de opstår. Et eksempel er, at forskere har brugt FFT til at analysere PMU-data og markere de tidsvinduer, hvor spektrale toppe afveg statistisk fra det normale – hvilket signalerer en net-hændelse eller oscillation ⁹. Således er FFT et værdifuldt værktøj i Energinets **frekvensovervågning**, fordi det både giver indblik i det generelle frekvensbillede og kan afsløre skjulte periodiske afvigelser, som rå tidsmålinger ikke umiddelbart viser.

Detektion af harmoniske forstyrrelser og støj

Harmoniske forstyrrelser er et velkendt fænomen i elsystemet – det er de uønskede frekvenskomponenter ved fx 100 Hz, 150 Hz, 250 Hz etc., typisk forårsaget af ikke-lineære laster og effektelektronik (frekvensomformere, vindmølleinvertere, store industrielektronik osv.). Disse overtoner “forurener” den ellers rene 50 Hz sinus og kan medføre ekstra tab, varmeudvikling og fejl i udstyr. For Energinet er det afgørende at holde de harmoniske niveauer under kontrol for at opretholde spændingskvaliteten.

FFT er det **primære værktøj** til at analysere harmoniske. Når man tager en målt spændings- eller strømbølge fra nettet og kører en FFT, vil resultatet tydeligt vise størrelsen af hver harmonisk komponent. FFT-analysen kan skelne mellem forskellige dele af signalet – de **ulige og lige harmoniske** såvel som andre forvrængningstyper som jævnkomponent (DC-offset), *interharmoniske* toner (ikke hele multiplum af 50 Hz), *notching* (hak i kurveformen) og bredbåndet *støj* ¹⁰. Med andre ord kan man via spektret se hele “forstyrrelseslandskabet” i spændingen/strømmen.

For en TSO bruges denne information til flere formål: Dels til overvågning – man holder øje med at ingen harmoniske overstiger de grænseværdier, der er fastsat i standarder og forskrifter. Dels til diagnosticering – hvis en bestemt harmonisk er meget høj et sted i nettet, kan man lede efter kilden (f.eks. en specifik fabrik eller park) og udbedre problemet, fx via filterinstallation. **Total harmonisk forvrængning (THD)** er et samlet mål, man typisk beregner ud fra FFT-spektrummet; det udtrykker den samlede procentvise forvrængning i forhold til grundkomponenten. THD kan direkte udledes fra FFT-resultaterne for spænding eller strøm ¹¹, og Energinet bruger sådanne tal til at vurdere om elkvaliteten er inden for acceptable grænser. Kort fortalt giver FFT et detaljeret fingeraftryk af harmoniske forstyrrelser i elsystemet, så TSO'en kan iværksætte tiltag som **harmoniske filtre**, omlægning af netdrift eller krav til tilsluttede enheder for at reducere forureningen.

Analyse af transiente hændelser

Transiente hændelser er kortvarige, pludselige begivenheder i elsystemet – f.eks. et lynnedslag, en kobling af en stor last/produktionsenhed, eller en kortslutning (fejl) der opstår og cleares igen. Sådanne hændelser viser sig som **hurtige sving** eller “spræl” i kurveformerne for spænding og strøm. De kan indeholde et bredt spektrum af frekvenser, fra lave mekaniske svingninger til meget højfrekvent støj. FFT kan anvendes på indspillede transiente forløb for at afdække, hvilke frekvenskomponenter der har været mest fremtrædende. For eksempel, hvis en koblingshændelse exciterer en *resonans* i systemet

ved 120 Hz eller skaber oversving, vil en FFT af spændingskurven under hændelsen vise en tydelig peak omkring 120 Hz. Dette hjælper ingeniørerne med at forstå hændelsen – var det en bestemt naturlig svingning i nettet, der blev aktiveret, eller kom der usædvanligt meget højfrekvent støj ind? Sådanne indsigter er vigtige for at vurdere, om udstyret har været udsat for potentielt skadelige påvirkninger.

Det skal dog understreges, at **FFT-analysen af transiente signaler har sine begrænsninger**. Den klassiske FFT antager, at signalet er nogenlunde stationært i det tidsvindue, man analyserer, hvilket ikke altid er tilfældet under en transient. Hvis man tager et langt tidsvindue, hvor signalet ændrer sig markant, kan FFT-resultatet blive "udtværet" (spektral leakage) og svært at tolke ¹². Derfor benytter man i praksis typisk **korte vinduer** (short-time Fourier transform) eller glidende FFT-analyser for at få et øjebliksbillede af frekvensindholdet under selve hændelsen. Trods disse udfordringer kan FFT stadig give værdifuld information: Den kan afsløre, om en transient primært bestod af én oscillerende mode eller bredbåndet støj, og den kan kvantificere amplituden af eventuelle højfrekvente komponenter. FFT er således et værktøj Energinet kan bruge i efteranalysen af store hændelser – f.eks. ved at køre en FFT på en registreret fejlsignatur for at se de dominerende frekvenser involveret i en spændingsdyk eller en afbrydelse. Dette bidrager til at **forbedre beskyttelsessystemer og modeller**, da man får indsigt i netop hvilke frekvensfænomener, der opstår ved ekstreme hændelser.

Realtids signalanalyse og systemstabilitet

En stor fordel ved FFT er dens beregningshastighed. Algoritmen reducerer antallet af operationer dramatisk (til ca. $N \log N$ for N datapunkter), hvilket gør det **praktisk at udføre spektralanalyse næsten i realtid** selv på store datastrømme ³. For en TSO som Energinet muliggør det kontinuerlig overvågning af systemets "sundhedstilstand". Man kan forestille sig, at der i kontrolcentret kører automatiske processer, som hele tiden tager de seneste målinger fra udvalgte stationer og laver en FFT: resultatet vil afsløre, om der dukker *nye suspekter frekvenser* op.

Realtids FFT-analyse kan bruges til **tidlig varsling** af problemer. Hvis systemet pludselig begynder at udvikle en oscillation (f.eks. en generator, der går i sving med en nabo), vil FFT'en øjeblikkeligt vise en peak ved den pågældende svingfrekvens, og et alarmsystem kan alarmerer operatører. Fordi beregningen er så hurtig, kan man reagere næsten øjeblikkeligt: Ingeniørerne (eller de automatiserede kontrolsystemer) kan *hurtigt vurdere oscillationens frekvens og omfang, identificere ustabilitetsrisici og iværksætte nødvendige modforanstaltninger* for at bevare netstabiliteten ³. Dette kunne være at aktivere dæmpende funktioner som PSS, justere effekten på HVDC-forbindelser for at modvirke svingninger, eller i ekstreme fald koble visse belastninger/produktioner af, før det udvikler sig til noget kritisk.

For Energinet, der forvalter et stort sammenhængende elsystem, er sådan **realtids FFT-baseret signalovervågning** et kraftfuldt redskab i toolbox'en for systemstabilitet. Det supplerer traditionelle beskyttelsesfunktioner ved at kigge efter *mønstre* snarere end blot tærskelværdier. I takt med at elnettet bliver mere dynamisk med mange nye komponenter, bliver denne type avanceret overvågning endnu mere relevant.

Eksempler fra kraftsystemer (cases)

FFT-teknologien er allerede blevet anvendt i en række sammenhænge i kraftsystemer for at løse konkrete problemer:

- **Harmonisk overvågning i vindmølleparker:** I et tilfælde målte man kvaliteten af strømmen fra en 10,8 MW vindmøllepark med en power quality-analysator. Ved hjælp af FFT kunne man

udtrække frekvensindholdet af spænding og strøm (samplet med fx 256 punkter per 20 ms cyklus) og beregne THD (total harmonisk forvrængning) under forskellige driftsscenarier ¹¹ ¹³ . Analysen viste, at især 5. og 7. harmoniske var til stede, og dette ledte til, at man designede filtre og justerede parkens konfiguration for at overholde kvalitetskravene. Denne case illustrerer, hvordan FFT giver et kvantitativt grundlag for beslutninger om filtrering og design i vedvarende energi-integration.

- **Inter-area oscillation i transmissionsnettet:** I det indonesiske Java-Bali system oplevede man fx en større blackout 4. august 2019, som efterfølgende blev analyseret. Ved at køre FFT på frekvensmålinger fra PMU'er identificerede man tydelige *svingningstilstande* på omkring 0,55–0,68 Hz i systemet efter en lastafbrydelse ¹⁴ . Denne information blev brugt til at tune Power System Stabilizers (PSS) på udvalgte kraftværker, således at netdæmpningen forøgedes på netop de frekvenser. Eksemplet viser, at FFT-analysen af systemoscillationer direkte kan omsættes til **forbedret stabilitet** via justering af kontrolsystemer.
- **Energinets håndtering af harmoniske baggrundsforstyrrelser:** I Danmark har Energinet bemærket en generel stigning i baggrundsniveauet af harmonisk forvrængning i transmissionsnettet i takt med den grønne omstilling. Gennem målinger og analyser (hvor FFT naturligvis indgår til at kvantificere forvrængningen) konstaterede man, at de hidtidige decentrale tiltag måske ikke var tilstrækkelige. Dette har ført til en ny tilgang, hvor **Energinet selv etablerer centrale harmoniske filtre** som en del af systemhåndteringen ⁷ . Ved at centralisere filtrene sikres en ensartet dæmpning af de uønskede frekvenser og dermed stabil spændingskvalitet i hele systemet. Denne case illustrerer, hvordan indsigter fra frekvensanalyser (FFT) af elnettet kan forme strategiske beslutninger og investeringer hos en TSO.

Disse eksempler demonstrerer bredden af FFT's anvendelighed: fra lokale analyser af en enkelt parks udgangskvalitet til globale systemoscillationer og overordnede netstrategier. Fælles er, at **FFT leverer de data og det indblik, der skal til for at forstå problemet og handle målrettet**.

Hvilke data analyseres med FFT i energisektoren?

For at FFT kan anvendes, skal man have *tidsdomæne*-målinger som input. I energisektoren betyder det typisk:

- **Spændings- og strømsignaler** målt over tid med høj opløsning. Power quality-målere eller digitale relæer i nettet samler ofte kurveformen tusindvis af gange per sekund. For eksempel kan en måler tage 256 samplingpunkter pr. netperiode (20 ms) for både spænding og strøm ¹³ . Disse rå tidsserier (evt. blot i nogle sekunders varighed) kan man køre en FFT på for at få frekvensindholdet: amplitude og fase af grundtonen (50 Hz) og alle overtoner op til den halve samplingsfrekvens. Sådanne data bruges typisk til harmonisk analyse og power quality-rapporter.
- **Frekvensdata og andre langsomme signaler** fra PMU'er eller andre systemmonitorer. En PMU (phasor measurement unit) måler kontinuerligt netfrekvensen samt fasevinkler med høj præcision, ofte 10-50 gange i sekundet. Ved at opsamle disse data over tid – f.eks. en time eller en dag – kan man med FFT undersøge om der er bestemte *lavfrekvente* udsving. Det kan f.eks. være oscillationer i området 0,1–2 Hz, som ikke er synlige i øjebliksbilledet, men som træder frem i frekvensdomænet. Forskningsprojekter og nogle kontrolcentre bruger faktisk FFT på PMU-data til at **detektere events og svingninger** automatisk ⁹ . Data af denne art er uvurderlige for at fange dynamiske interaktioner i det store elnet.

- **Transiente hændelsesoptagelser.** Efter store forstyrrelser (fejl, lyn, koblinger) gemmer Energinets udstyr ofte en **COMTRADE-fil** eller lignende med højhastighedsoptagelser (f.eks. 10 kHz sampling i nogle sekunder) af spænding/strøm. Disse filer analyseres typisk offline, og her kan ingeniører anvende FFT på udvalgte tidsintervaller af optagelsen for at se spektret af hændelsen. Man får måske en graf, der viser at "under fejlen havde vi meget energi ved 400 Hz – tegn på bryderresonans" eller lignende. Sådanne data er meget tekniske, men de giver **indsigt i det fine forløb** af hændelsen og kan bruges til at forbedre modelvaliditet og beskyttelsesindstillinger.

Kort sagt: alle former for elektriske tidsserier kan analyseres med FFT, fra de **langsomt varierende** (frekvens, effekt osv.) til de **hurtigt oscillerende** (spændingskurver). Valget af sampling og vindueslængde afhænger af, hvad man kigger efter – men princippet er det samme.

Fra FFT-analyse til beslutning og automatisering

Data og resultater fra FFT gør ikke nytte i sig selv, før de omsættes til handling eller beslutninger. I Energinets sammenhæng sker dette på flere niveauer:

- **Operatørbeslutninger og planlægning:** Når FFT-analyser peger på et problem, kan TSO'en træffe informerede beslutninger. Som nævnt ovenfor bruger Energinet f.eks. harmoniske analyser til at beslutte, om der skal installeres ekstra filtre i nettet. Hvis målingerne viser, at 5. harmoniske nærmer sig en kritisk grænse i et område, kan det indgå i planlægningen at opstille et harmonisk filter eller kræve af en tilsluttet part, at de reducerer deres emission. Tilsvarende, hvis FFT afslører en systematisk 0,3 Hz svingning mellem to regioner, kan man beslutte at finjustere generatorernes PSS-indstillinger eller måske forstærke netforbindelserne mellem regionerne for at dæmpe svingen. FFT-resultaterne giver altså **kvantitativ evidens**, der understøtter sådanne strategiske valg.
- **Automatiserede systemer og beskyttelse:** FFT kan integreres i *online*-overvågningssystemer, der automatisk udløser alarmer eller handlinger. Et tænkt eksempel: et monitoreringssystem kører løbende FFT på spændingssignaler og opdager pludselig en markant komponent ved 600 Hz, som overskrider en tærskel. Dette kunne automatisk trigge en alarm om "mulig resonans eller harmonisk fejl" til kontrolrummet. I nogle avancerede beskyttelsesrelæer bruger man også princippet til at opdage f.eks. højfrekvente signaturer af lysbuer (ved højspændingsfejl) og afbryder fejlen hurtigere end traditionelle metoder. Fordi FFT hurtigt kan kvantificere oscillationens styrke, kan automatiske systemer også prioritisere: f.eks. ignorere små uskyldige svingninger men reagere på store, farlige afvigelser. **Beslutningsstøttesystemer** i kontrolcenteret kan præsentere operatørerne for et "frekvensvarmekort" – hvilke frekvenser er aktive i systemet lige nu – så de bedre kan vurdere systemets tilstand.
- **Stabilitetskontrol:** Nogle kontrolsystemer kan tage FFT-resultater og direkte modvirke de uønskede frekvenser. For eksempel i HVDC-systemer kan styringen programmeres til at *dæmpe svingninger* ved bestemte frekvenser: HVDC'en kan modtage input fra en FFT-baseret detektor, som siger "der er en 0,5 Hz oscillation i gang", hvorefter den justerer effektflow modulering for at modvirke denne. Ligeledes kan *aktiveringen af et batterilager* tænkes trigget af en detekteret frekvensanomali (hurtige frekvensfald kan indikere behov for støttende effekt). Denne type anvendelse er endnu under udvikling forskellige steder, men princippet er klart – ved at have **spektral information i realtid** kan reguleringsenheder målrettes meget præcist.

Samlet set sørger FFT-analyser for, at Energinet og dets systemer **ikke flyver blinde**. De giver et dybere indblik i strømmen af energi: hvilke "toner" der spiller rent, og hvilke der skurrer. Når en "falsk tone" (frekvensforstyrrelse) opdages, kan Energinet enten manuelt eller automatisk stemme systemet ved at justere driften, indsætte modspil eller planlægge forstærkninger. Dette gør elsystemet mere robust, stabilt og velfungerende. **FFT er således et bindeled mellem rå måledata og klarsynede handlinger** – et værktøj der oversætter komplekse signaler til brugbar viden, hvilket er afgørende for en TSO som Energinet i dag. ¹⁵ ¹⁶

Kilder:

1. Dakhlan *et al.*, "Comparing Fast Fourier Transform and Prony Method for Analysing Frequency Oscillation in Real Power System Interconnection," *Energies*, vol. 18, no. 9, p. 2377, 2025 – (Beskrivelse af FFT's rolle i energisystemer, identifikation af harmoniske/interharmoniske og oscillationer, mm.) ⁵ ⁸
 2. Eaton, "Waveforms overview and advanced analysis", Thought Leadership White Paper, 2023 – (Forklaring af FFT i kraftsystemer, harmonisk analyse og begrænsninger ift. transiente signaler) ⁴ ¹⁷
 3. Nadia Journal, "Harmonic Analysis Using FFT and STFT," 2014 – (Noter om hvordan FFT-spektrum viser harmoniske, interharmoniske, notching, støj mv. i et forvrænget signal) ¹⁰
 4. MathWorks MATLAB Central, "Harmonic Analysis with FFT in a Wind Farm," 2019 – (Eksempel hvor måledata fra en vindmøllepark analyseres med FFT for at udregne THD for spænding og strøm) ¹¹ ¹³
 5. NREL, "PMU Data Event Detection: A User Guide for Power Engineers," 2015 – (Anvendelse af FFT på PMU-målinger for at detektere systemhændelser automatisk) ⁹
 6. Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, "Orientering om Energinets nye tilgang til håndtering af harmoniske baggrundsforstyrrelser," 19. sep. 2025 – (Baggrund for Energinets filterstrategi; stigende harmonisk forvrængning og dens påvirkning på elkvalitet og stabilitet) ⁷
-

1 2 3 5 8 12 15 16 Comparing Fast Fourier Transform and Prony Method for Analysing Frequency Oscillation in Real Power System Interconnection

<https://www.mdpi.com/1996-1073/18/9/2377/pdf?version=1746677131>

4 6 17 Waveforms overview and advanced analysis

<https://www.eaton.com/content/dam/eaton/services/eess/eess-documents/waveforms-overview-and-advanced-analysis.pdf>

7 KEF, Alm.del - 2024-25 - Bilag 405: Orientering om Energinets nye tilgang til håndtering af harmoniske baggrundsforstyrrelser, fra klima-, energi- og forsyningsministeren

<https://www.ft.dk/samling/20241/alm.del/KEF/bilag/405/3069824/index.htm>

9 PMU Data Event Detection: A User Guide for Power Engineers

<https://docs.nrel.gov/docs/fy15osti/61664.pdf>

10 article.nadiapub.com

http://article.nadiapub.com/IJSIP/vol7_no4/33.pdf

11 13 Harmonic Analysis with FFT Method in a Wind Farm - MATLAB Answers - MATLAB Central

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/486539-harmonic-analysis-with-fft-method-in-a-wind-farm>

14 Comparing Fast Fourier Transform and Prony Method for Analysing Frequency Oscillation in Real Power System Interconnection

<https://www.mdpi.com/1996-1073/18/9/2377>