

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Smarta skydd	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Smart protection	
Universitet/högskola/företag Kungliga tekniska högskolan	Avdelning/institution Elkraftteknik
Adress Teknikringen 33	
Namn på projektledare Lars Nordström	
Namn på ev övriga projektdeltagare Tin Rabuzin, Nathaniel Taylor,	
Nyckelord: 5–7 st. Förnybar kraftproduktion, skyddssystem, digitalisering	

Förord

Projektet har bedrivits som ett doktorandprojekt under perioden 2017-2019 av avdelningarna för elkraftteknik och elektroteknisk teori och konstruktion på KTH tillsammans med Vattenfall distribution AB och Ellevio AB. Projektet har finansierats av energimyndigheten tillsammans med KTH, Vattenfall och Ellevio. Projektets referensgrupp har bestått av Lars Nordström och Nathaniel Taylor från KTH tillsammans med Bengt Almgren (2017) och Christer Flood från Ellevio och Anders Johnsson från Vattenfall eldistribution.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	3
Summary	3
Inledning/Bakgrund	4
Genomförande	5
Skyddsalgoritm och ö-drift.	5
Digital plattform för skyddsfunktioner	6
Resultat	6
Diskussion.....	6
Publikationslista.....	7
Bilagor	8

Sammanfattning

När energisystemet ställs om, ökar mängden elkraft från förnybara källor som vindkraft och solkraft. Vindkraften installeras på platser runt om i landet där elsystemet inte alltid är förberett för detta – distributionssystemet, särskilt vad gäller skydds och automation system är anpassade för att distribuera elen från centrala kraftverk ut till bostäder och industrier, inte för att anslut många vindkraftverk runt om i landet.

Projektet Smarta skydd handlar om vilken utveckling som krävs av de skyddssystem som används i dagens el-distributionsnät för att anpassa dem till den pågående anslutningen av stora mängder förnybar kraftproduktion, t.ex. vindkraft. Dels krävs förbättrade skyddsalgoritmer som kan hantera de nya fenomen som kan uppstå i näten. Dels står skydds-tekniken inför ett generationsskifte, där digitaliseringen medför många nya möjligheter till kommunikation och styrning på sätt som tidigare inte varit möjligt.

Dessa två faktorer tillsammans har påverkat projektets genomförande. En del av projektet har bestått i att ta fram exempel på nya IT system för att kunna utnyttja den ökade kommunikationen och flexibiliteten i datorsystemen när man utformar skyddsfunktioner för eldistributionsnät. Som exempel på detta har KTH tillsammans med Vattenfall eldistribution tagit fram en IT plattform som avsevärt förenklar utveckling av skyddsfunktioner, genom att utnyttja bl.a. IEC 61850 standarden och Open source mjukvara för att konfigurera skydd. Den andra delen av projektet har fokuserat på hur elsystemet förändras och hur skyddsfunktionerna måste förbättras. Här har projektet resulterat i en skyddsalgoritm för att snabbt detektera situationer av ö-drift, där t.ex. en vindkraft oavsiktligt strömförsörjer ett område. Den nya skyddsalgoritmen uppfyller alla krav på noggrannhet och exakthet, och behöver framförallt inte konfigureras utan är själv-lärande.

Summary

As the energy system develops, the amount of electric power from renewable sources such as wind power and solar power increases. Wind power is normally installed in locations around the country where the distribution system is not always prepared for this - the distribution system, especially in terms of protection and automation systems, is adapted to distribute electricity from central power plants to homes and industries, not to connect wind power plants around the country.

The Smart Protection project concerns the required development of the protection systems used in today's electricity distribution networks to adapt them to the ongoing connection of large amounts of renewable power generation. On the one hand, improved protection algorithms are needed that can handle the new phenomena that may arise in the networks. On the other hand, the protection technology is facing a generation shift, where digitalization brings many new opportunities for communication and control in ways that have not previously been possible.

These two factors together have affected the project's implementation. Part of the project has consisted of developing examples of new computing and communication systems to be able to utilize the increased communication and flexibility of the computer systems when designing protection functions. As an example of this, KTH, together with Vattenfall eldistribution, has developed an IT platform that considerably simplifies the development of protection functions, by utilizing, among other things, IEC 61850 standard and Open source software to configure protection systems. The second part of the project has focused on how the electrical system is changing and how the protection functions must be improved. Here, the project has resulted in a protection algorithm for quickly detecting situations of island operation, where e.g. an uncontrolled wind power park supplies an area. The new protection algorithm meets all the requirements for accuracy and reliability, and above all does not need to be configured but is self-learning.

Inledning/Bakgrund

Skyddssystemet utgör en av grundfunktionerna i alla elkraftsystem, utan ett väl fungerande skyddssystem kan inte stabil och säker elförsörjning garanteras. Skyddssystemet säkerställer bortkoppling av utrustning i händelse av fel och skyddar på så sätt liv och egendom från större skador. Utformning av skyddssystemen är beroende av kraftsystemets funktion, och den pågående omdaning av elförsörjningen till distribuerad och icke styrbar produktion från vind och sol ställer krav på helt nya skyddsfunktioner som är anpassade till kraftsystemets driftläge. Det är inte lägre tillräckligt att använda historiska och statistiska modeller om hur energin flödar i distributionsnät. Detta är särskilt relevant på mellanspänningsnivå, där större produktionsanläggningar ansluts och näten till delar är maskade. Även på lågspänningsnivå i distributionsnäten kan dock problem uppkomma med motriktade flöden på grund av hög produktion från solceller under situationer av låg last. Traditionella överströmsskydd och jordfelskydd med inställningar baserade på traditionella driftlägen kommer inte att klara av dessa nya lägen.

Samtidigt med dessa nya elektrotekniska krav pågår en utveckling mot ökad datorisering och utnyttjande av kommunikation och informationssystem för att effektivisera mätning, automation och styrning av kraftsystemet. Denna utveckling innebär både nya möjligheter att möta de nya kraven på skyddssystemen samtidigt som det ställer nya krav på säker och tillförlitlig utformning av skyddssystemen för att inte riskera elförsörjningen.

Den bärande tanke som löpt genom projektet är att den ökade digitaliseringen inte bara kan användas för att inkrementellt förbättra skyddssystemen, utan också utgöra en grund för radikalt annorlunda systemarkitekturer och skyddsalgoritmer. Projektet har genomförts som ett doktorandprojekt i tätt samarbete med de industriella parterna, detta för att kunna utveckla både kunskap inom nya skyddsalgoritmer och analysera möjligheterna med systemplattformar för skyddssystem.

Genomförande

Projektet har genomförts som första halvan av ett doktorandprojekt, med ett antal anknyttande mindre delprojekt som utförts av seniorforskare och forskningsingenjörer. Som doktorand antogs i mitten av 2017 Tin Rabuzin som sedan dess varit den som till största del varit verksam i projektet,Handledare för doktorandprojektet har varit Nathaniel Taylor och Lars Nordström. Utöver dessa personer har experter från de medverkande industriföretagen deltagit, dessa är Anders Johnsson och Wu Yiming från Vattenfall och Christer Flood från Ellevio. Under projektets gång ha dessutom ett antal forskningsingenjörer/projektarbetare varit engagerade, här bör nämnas Francisco da Lima, Emelie Frost, Jianan Zhang, Federica Ferro och Aryudha Hartono.

Första steget i projektet bestod i att tillsammans med industriparterna analysera systemläget för att beskriva de utmaningar för skyddssystem som förväntas cirka år 2030 på grund de tidigare beskrivna ändringarna i elproduktion och användning. Detta arbete resulterade i en teknisk rapport [11], denna rapport utgjorde också underlag för att kunna identifiera den skyddsalgoritm – identifiering av ö-drift – som projektet fokuserat på. I samband med detta utvecklades också modeller av typnät i Simulink för senare användning i real-tids-simulator.

I detta skede beslutades också att driva projektet längs två parallella spår, med doktorand Tin Rabuzin som projektledare för bägge spåren för att få god samordning. Utvecklingsspåren beskrivs nedan.

Skyddsalgoritm och ö-drift.

Huvudfokus för detta utvecklingsspår har varit att utveckla en tillförlitlig algoritm för identifiering av ö-drift i distributionsnät med inbäddad kraftproduktion. Arbetet har bestått av två delar, dels modellering av kraftnät från industriparterna att använda för verifiering av resultat. Här har Jianan Zhang's arbete tillsammans med Ellevio resulterat i användbara modeller som finns rapporterade i [12]. Dessa modeller har också använts för att demonstrerar olika fall av ö-drift som kan uppstå, samt lämpliga metoder för att detektera dessa. Tillsammans med Ellevio har även Emelie Frost studerat åter-synkronisering av kraftsystem efter ö-drift [3].

Utöver dessa resultat har arbetet med en ny skyddsalgoritm resulterat i att en självlärande algoritm för detektering av ö-drift som uppfyller kraven på noggrannhet och tillförlitlighet. Algoritmens funktion bygger på tillgång till fasvinkelmätningar (PMU) vilket ännu ej är tillgängligt i någon större omfattning i distributionsnäten. Av den anledningen har algoritmens funktionalitet verifierats med data från det nordiska transmissionssystemet. Algoritmen finns beskriven i två olika vetenskapliga publikationer vilka dels presenterats på IEEE Smartgrid-Comm 2018 [8] och är under granskning för publicering i en tidskrift [9].

Digital plattform för skyddsfunktioner

Ellevio har, utanför projektets ram, parallellt bedrivit ett projekt i vilket flera stationer utrustats med skyddsfunktioner enligt en ny modulär struktur som bygger på en centraliserad logik-enhet och distribuerade in och utgångar. Vattenfall driver, även det utanför projektets ram, sedan flera år en utveckling mot att använda IEC 61850 standarden fullt ut i stationsutrustning.

Dessa två parallella utvecklingar har varit viktig input till projektet, och gett underlag för bland annat utarbetande av en rapport kring centraliserade skydd [5]. Samt inte minst - i samarbete mellan KTH och Vattenfall - en plattform baserad på öppen källkod som medger flexibel konfigurering av skyddsfunktioner och nedladdning till generiska logik-enheter, [1] och [6]. I princip behöver lösningen ej dedikerad skyddshårdvara för att exekvera skyddsfunktionerna, och konfigurering kan ske i en standardiserad ”drag-and-drop” miljö snarare än genom dedikerade användargränssnitt i skydd. Därutöver har en applikation som analyserar feltyper genom automatiserad inlärning av mätdata från COMTRADE utvecklats. Denna är dessutom förberedd för integration med övriga kontrollsystem genom en anpassning till CIM IEC 61970 standarden. Denna applikation finns beskriven i [2].

Resultat

Specifikt ska följande framhållas, vilket också beskrivs mer utförligt i avsnittet ”Genomförande” ovan.

- Sjävlärande skyddsalgorithm för snabb och säker identifikation av ö-drift. [8], [9].
- Plattform baserad på öppen källkod och internationella standarder för användarvänlig konfigurering av skyddsfunktioner [1], [6].
- Applikation för analys av feltyper i distributionsnät baserad på automatisk inlärning från COMTRADE filer anpassad för IEC 61970 [2].

Därutöver hänvisas till beskrivningen i avsnittet genomförande ovan.

Diskussion

Projektet är ett forskningsprojekt, och resultaten har därför en tyngdpunkt inom kunskapsuppbyggnad, särskilt då inom framtida skyddssystem. Utifrån detta perspektiv kan man lämna tre kommentarer.

Behovet av utveckling, och utbildning, inom digitalisering i vid bemärkelse i elkraftbranschen är stort. På grund av de långa livslängderna på utrustningen i kraftsystemet blir ofta även gamla IT-system i drift länge. Med det följer dels att möjligheterna till nya effektivare lösningar missas, och att det blir svårt att upprätthålla kompetens om en mängd olika och föråldrade teknikplattformar. Detta projekt kan bidra genom att introducera dels kompetens om nya IT

lösningar, och inte minst genom användandet av internationella öppna standarder som IEC 61850 och IEC 61970.

Varefter distributionsnäten blir allt mer ”aktiva”, dvs andelen förnybar produktion på mellanspänningsnivå ökar kommer behovet av mer flexibla skyddslösningar att öka. Ö-drift, som detta projekt studerat, kan antas vara det första problem som kan behöva hanteras mer systematiskt. Redan nu används skydd för att identifiera och förhindra ö-drift, men de är inte helt tillförlitliga och leder ibland till oavsiktlig bortkoppling med strömavbrott som följd. Varefter behovet ökar måste dessa system bli mer säkra, detta för att inte oavsiktligt riskera att underblåsa uppfattningen att vindkraften hotar stabiliteten i elnätet.

En tredje aspekt på resultaten har ett något längre tidsperspektiv och det gäller den kunskap som byggts upp inom projektet avseende databaserad inläring av elsystem modeller. Den själv-lärande skyddsapplikationen som utvecklats bygger på metoder som i förlängningen kan utvecklas till att kunna identifiera dynamiska modeller av hela eller delar av kraftsystemet. Det är mycket relevant kunskap i den pågående anpassningen mot EU:s nätkoder vilka bland annat föreskriver att distributionsnät skall exportera dynamiska modeller av kraftnät till transmissionsnätoperatören.

Publikationslista

- [1] F. De Lima, ”Power System Protection Modelling with IEC 61850 and IEC 61499”, Master’s Thesis, KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS), 2019.
- [2] F. Ferro, ”Leveraging a service oriented architecture for automatic retrieval and processing of fault recordings to obtain information for maintenance of circuit breakers”, Master’s Thesis, KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS), 2019.
- [3] Frost, Emelie, ”Resynchronisation of islanded power systems”, Master’s Thesis, KTH - Royal Institute of Technology, Stockholm, 2020.
- [4] A. Hartono, ”Microgrid Safety and Protection Strategies”, Master’s Thesis, KTH, Electromagnetic Engineering, 2018.
- [5] F. Hohn, T. Rabuzin, J. Wang, och L. Nordström, ”Distributed signal processing units for centralised substation protection and control”, *The Journal of Engineering*, vol. 2018, nr 15, s. 1223–1228, okt. 2018, doi: [10.1049/joe.2018.0206](https://doi.org/10.1049/joe.2018.0206).
- [6] G. S. Karthik, ”Components for IEC 61499 based protection development”, Master Thesis, KTH - Royal Institute of Technology, Stockholm, 2020. (In preparation)
- [7] T. Rabuzin, F. de Lima, Y. Wu, och L. Nordström, ”Automated Transformation of IEC 61850 Substation Models to IEC 61499 Applications”
- [8] T. Rabuzin, J. Lavenius, N. Taylor, och L. Nordstrom, ”Bayesian Detection of Islanding Events Using Voltage Angle Measurements”, i *2018 IEEE International Conference on Communications, Control, and*

- Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Aalborg, 2018,
- [9] T. Rabuzin och Nordström, Lars, "Bayesian Islanding Detection using Principal Subspace of Voltage Angle Differences", *IEEE Transactions on Power Delivery*.
 - [10] T. Rabuzin, F. Hohn, och L. Nordstrom, "Computation of Sensitivity-Based Islanding Detection Parameters for Synchronous Generators", s. 7, 2020.
 - [11] Rabuzin, Tin, "Distributed Generation | Associated Protection Issues", KTH - Royal institute of Technology, Stockholm, TRITA-EE 2017:075, juni 2017.
 - [12] J. Zhang, "Anti-Islanding Protection in Distribution Grids", Master's Thesis, KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS), 2019.

Bilagor

Bilaga 1 - Administrativ bilaga