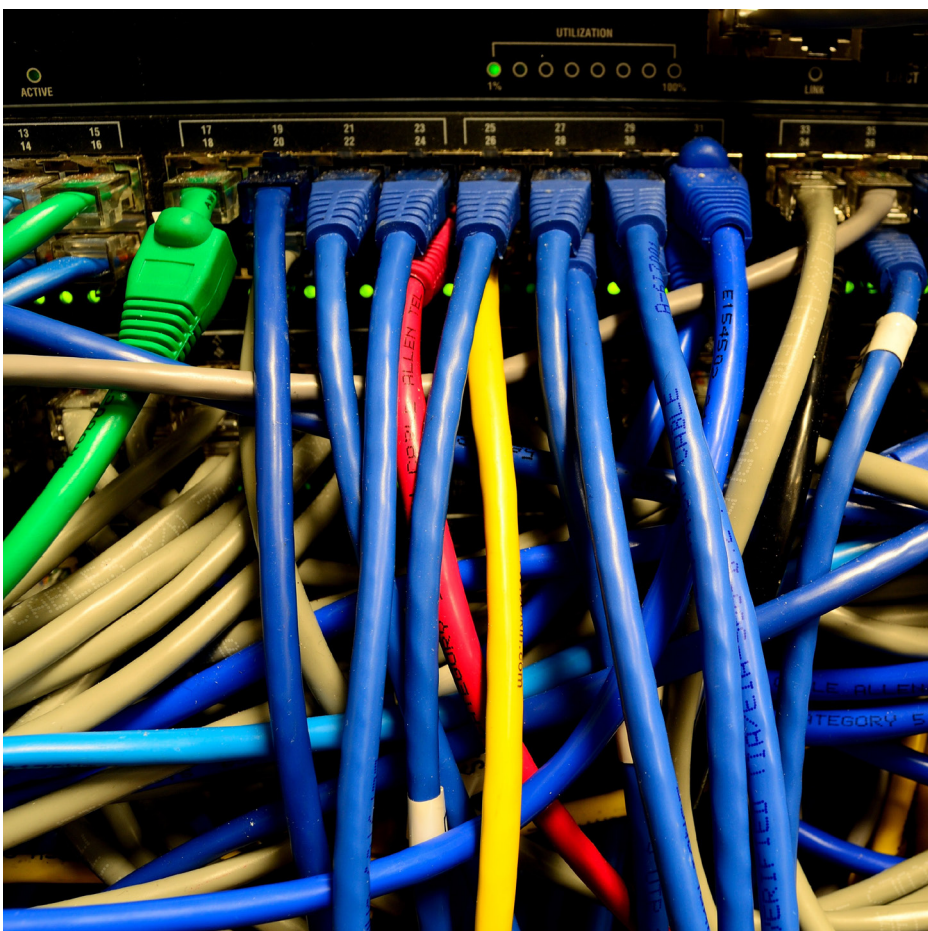


AI FÖR OPTIMERING AV DATACENTER MICROGRID INTEGRATION

RAPPORT 2019:599



AI för optimering av Datacenter Microgrid Integration

En förstudie för att identifiera hinder och möjligheter

MATTIAS VESTERLUND
SEBASTIAN FREDRIKSSON
RICKARD BRÄNNVALL

ISBN 978-91-7673- 599-2 | © Energiforsk augusti 2019

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Projektet *AI för optimering av datacenter Microgrid Integration* vars syfte var att genomföra en förstudie för att belysa möjligheterna med att använda AI för optimering av ett komplext datacenter med målet att skapa en optimeringsstruktur som baseras på mätdata i realtid samt tar hänsyn till väderleksprognoser. Projektet, som tillhörde programmet Smarta Elnät, kom fram till att Machine Learning eller Deep Learning passar bra för att beskriva system med realtidsmätdata, men att tekniken inte lämpar sig för att göra prognoser.

Mattias Vesterlund på RISE SICS North har varit projektledare för projektet.

Energiforsk vill framföra ett stort tack till referensgruppen, som bidragit med synpunkter, erfarenheter och varit ett bollplank för Mattias under projektets gång. Referensgruppen har bestått av:

- Christian Johansson (Svenska kraftnät)
- Maria Lindholm (E.ON)
- Robert Saers (ABB)
- Sebastian Fredriksson (RISE)
- Shiva Sander-Tavallaey (ABB)
- Ulrika Morild (Vattenfall)

Programmet Smarta Elnäts programstyrelse, som initierat, följt upp och godkänt projektet, består av följande ledamöter:

- Peter Söderström, Vattenfall Eldistribution AB (ordförande)
- Torbjörn Solver, Mälarenergi AB (vice ordförande)
- Mira Rosengren Keijser, Svenska kraftnät
- Patrik Björnström, Sveriges ingenjörer (Miljöfonden)
- Kristina Nilsson, Ellevio AB
- Björn Ållebrand, Trafikverket
- Ferruccio Vuinovich, Göteborg Energi AB
- Per-Olov Lundqvist, Sandviken Energi AB
- Claes Wedén, ABB AB
- Daniel Köbi, Jämtkraft AB
- Hannes Schmied, NCC AB
- Mats Bergström, Umeå Energi Elnät AB
- Magnus Sjunnesson, Öresundskraft AB
- Henric Johansson, Jönköping Energi AB
- David Håkansson, Borås Elnät AB
- Peter Addicksson, HEM AB
- Matz Tapper, Energiföretagen Sverige (adjungerad)
- Anders Fredriksson, Energiföretagen Sverige (adjungerad)

Följande bolag har deltagit som intressenter till projektet. Energiforsk framför ett stort tack till samtliga bolag för värdefulla insatser.

Vattenfall Eldistribution AB
Ellevio AB
Svenska Kraftnät
Göteborg Energi AB
Elinorr ekonomisk förening
Mälarenergi Elnät AB
Krafttringen Nät AB
Jämtkraft AB
Umeå Energi Elnät AB
Öresundskraft AB
Karlstads Elnät AB
Jönköping Energi Nät AB
Halmstad Energi & Miljö Nät
AB Falu Elnät AB
Borås Elnät AB
AB Borlänge Energi
C4 Elnät AB
Luleå Energi AB
ABB AB
Akademiska Hus
NKT Cables AB
NCC Construction Sverige AB
Trafikverket
Storuman Energi AB

Stockholm i augusti 2019

Susanne Stjernfeldt
Energiforsk AB
Programområde Elnät, Vindkraft och Solel

Sammanfattning

Som följd av det allt mer uppkopplade samhället och digitalisering av industrin har etablering av datacenter alltjämt ökat och utgör idag en viktig del av vår infrastruktur. Det här projektet syftar till att undersöka möjligheterna till att använda Artificiell Intelligens för driftoptimering av datacenter kopplat till ett mikronät. Studien visar att Machine Learning inte förmår ge särskilt noggranna prognoser för variabler med ett starkt stokastiskt¹ inslag som elpriser, men fungerar desto bättre för att beskriva fysikaliska operativa storheter i ett system där mätdata finns tillgänglig.

Genom att schemalägga beräkningar och vid rätt tidpunkter använda datacentrets batterilager kan anläggningens högsta effektförbrukning reduceras, med det göra en besparing på den effektagift som betalas mot energibolaget. Den beräknade besparingen måste dock vägas upp mot den kostnad som varje i och urladdningscykel i batterilagret kostar. Vidare skulle samma lager kunna användas för frekvensreglering mot el-nätet, studier bedömer FCR-D (Frequency Containment Reserv Disturbance, d.v.s. primära metoder för återställning av frekvens inom kort tidshorisont) som mest lämplig i datacenter sammanhang. Litium-jon batterier är den typ av batterier som är mest fördelaktigt att använda i samband med effekt och frekvensreglering, när den klarar fler laddningscykler och högre effekter än traditionell bly-syra batterier.

Slutligen har en layout upprättats som visar hur en fullskalig optimerings struktur skulle kunna se ut. En rutin som genomför optimering på verkliga mätdata från anläggningen själv som tar in aspekter så som: väderprognos, sol-el, el-priser, kylproduktion, IT-last, lagring (el och kyla) m.fl.

¹ slumpmässigt

Summary

Because of the increasingly internet of things and the digitization of industry, the establishment of data centers has increased and is today an important part of our infrastructure. This project aims at exploring the possibilities of using Artificial Intelligence's for operation optimization of a data centers connected to a micro-grid. The study shows that Machine Learning is not able to give sufficiently accurate forecasts of variables like grid prices due to their stochastic nature, but is better at describing physical operational quantities of a system where measurement data is available.

By using the data center's battery storage at the right time, the highest power consumption of the plant can be reduced, with results in a saving on the power tax paid to the energy company. However, the estimated savings must be weighed against the cost of each loading cycle in the battery pack. Furthermore, the same layer could be used for frequency regulation against the electricity grid, where previous studies suggest that FCR-D (Frequency Containment Reserv Disturbance, i.e. primary methods operating over the short time horizon) as most appropriate in data center context. Lithium-ion batteries is the type of batteries that are most advantageous to use in conjunction with power and frequency regulation, when it can handle more charging cycles and higher effects than traditional lead acid batteries.

Finally, a layout has been made showing how a full-scale optimization structure could look like. A routine that performs optimization on actual measurement data from the plant itself, which incorporates aspects such as: weather forecast, solar electricity, electricity prices, refrigeration production, IT load, storage (electricity and cooling) and others.

Innehåll

1	Inledning och bakgrund	8
1.1	Syfte och mål	8
2	Artificiell intelligens	9
3	Tariffer	12
4	Effektkompensatorer	14
5	Frekvensreglering	17
6	DMI och Machine Learning	20
6.1	Delmål	21
6.2	Styrstrategier	26
6.3	Prediktion av elpriser	26
7	Slutsatser	29
8	Fortsatt arbete	30
9	Referenser	31

1 Inledning och bakgrund

År 2012 stod Informations Kommunikations Tekniker (IKT) för 3,9 % av den totala globala el-användningen och år 2012 för 4,6 %, för datacenter uppskattas den årliga tillväxttakten vara 4 %. Genom ett ökat intresse för molnbaserade tjänster och lagring kommer behovet av servrar att öka och med det datacenters andel av totala el-användandet (Heddegem, 2014).

Dilemmat en datacenterägare ofta står inför är avvägningen mellan maximal lönsamhet och minimering av miljöpåverkan. Det finns idag många bra och användbara energibesparande tekniker som på olika sätt bidrar till ett effektivare och mer miljövänligt datacenter, och genom att använda förnyelsebar energi kan miljöpåverkan från väsentligt minskas (Ron et al., 2016). Vid användning av batterilagret i ett datacenter skulle förbrukningen av fossilbaserad el kunna minskas, genom urladdning när förnybar el inte finns tillgänglig och laddning när det finns tillgängligt (Goiri et al., 2015).

Många forskare har fokuserat på att utveckla kunskap, verktyg och standarder för att använda mer effektiva tekniker för att minska elförbrukningen i datacenter och introducera förnybara energikällor. Genom att använda effektiva el och kyl-system med gröna driftlägen kan man minska miljöpåverkan, t.ex. är frikyla en teknik som ökat i användning och ger en stor positiv effekt i minskad användning av el för produktion av kyla (Oró et al., 2015).

1.1 SYFTE OCH MÅL

Det här projektet utgör en förstudie som syftar till att undersöka möjligheterna till att använda Machine Learning² för optimering av driften för ett datacenter och på det sättet öka användandet av förnyelsebara energikällor. Målsättningen är att lägga en bra grund för att vid ett vidare arbete utveckla och implementera en fungerande rutin som tar hänsyn till:

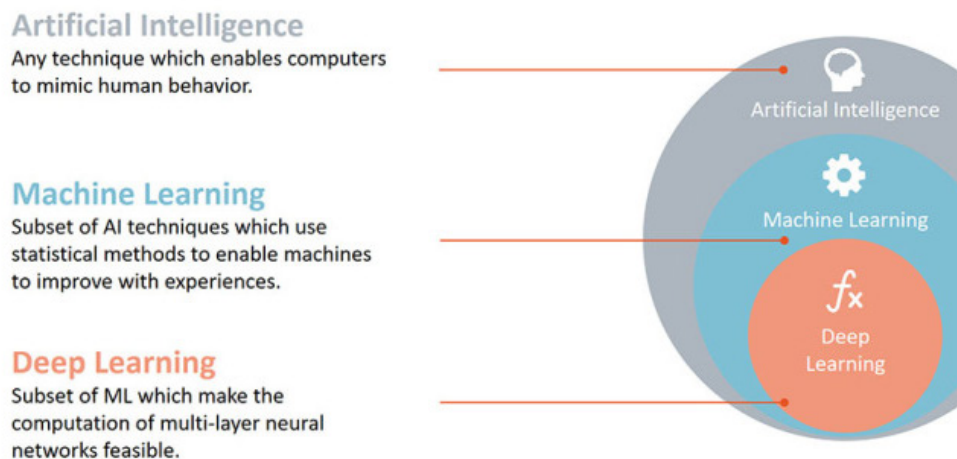
- Väderprognosen
- Prognosen för kommande el-pris och IT-last.
- Aktuella lagernivåer i batterier och kyl-tank

Det i syftet för att skapa en holistisk optimering som både kan optimeras ur ett ekonomiskt och miljömässigt perspektiv.

² på svenska maskininlärning

2 Artificiell intelligens

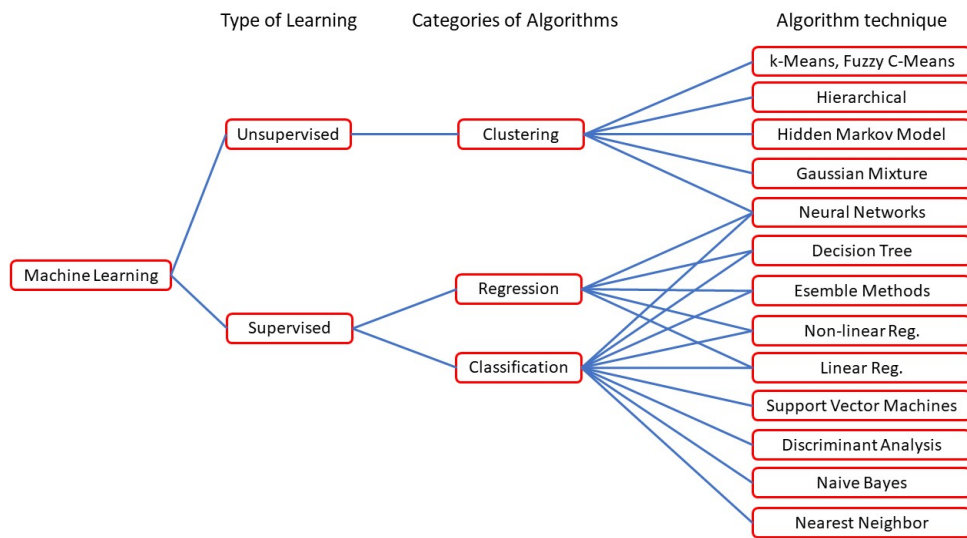
Artificiell Intelligens (AI) är ett samlingsnamn för datorbaserade tekniker och algoritmer som kan härma det mänskliga beteendet, där även Machine Learning (ML) och Deep Learning (DL) är undergrupper (Figur 1). Ett framstående företag inom AI är Boston Dynamics som har skapat robotar som i stort sett kan efterlikna samma beteende som en människa.



Figur 1, förhållandet mellan Artificial Intelligence, Machine Learning och Deep Learning³.

Machine Learning utgör en del inom AI och kan indelas i två huvudtyper; icke tränat och tränat lärande enligt Figur 2. För kategorin icke tränat lärande är klusterbildning av data det stora området, för tränat lärande är klassificering (diskret output) och regression (kontinuerlig output) de två huvudsakliga områdena.

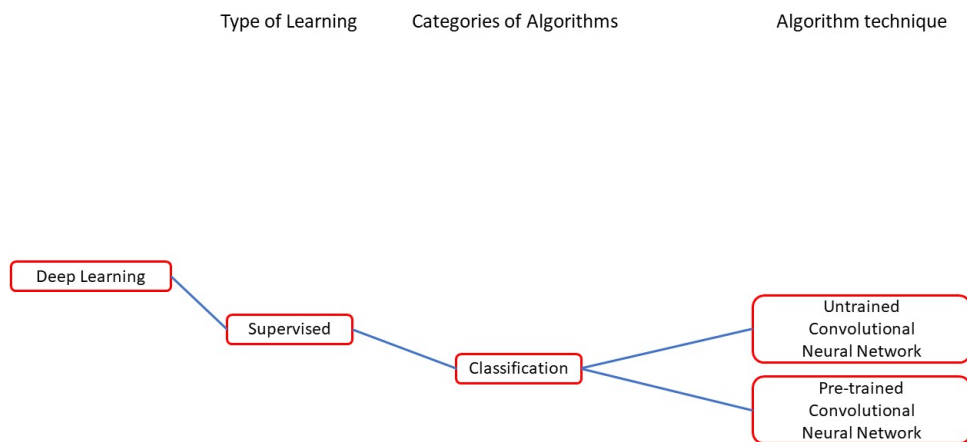
³ <https://rapidminer.com/artificial-intelligence-machine-learning-deep-learning/>



Figur 2, Machine Learning, uppdelat på typ av lärande, kategori och algoritm.

För de olika kategorierna finns ett flertal algoritmtekniker utvecklade och när det är bestämt vilken typ av kategori som problemet utgör kan de olika teknikerna tränas på en utvald mängd mätdata. För att kunna utvärdera de olika algoritmerna valideras dem på en ny obeprövad mindre mängd mätdata och på det sättet kan deras noggrannhet jämföras och den mest passande väljas för implementering.

Deep Learning utgör en specifik nisch inom klassificering för Machine Learning där ett avancerat artificiellt neuralt nätverk (ANN) med många nivåer tränas för egenskaper, representationer och uppgifter direkt från bilder, texter och ljud (Figur 3). Den är direkt användbar på mätdata och inkluderar funktionen för egenskapsextraktion, vilket annars måste göras manuellt inom Machine Learning.



Figur 3, Deep Learning, uppdelat på typ av lärande, kategori och algoritm.

Under den senaste tiden har noggrannheten i Deep Learning förbättrats avsevärt, men kan ibland kräva upp till miljontals av träningsobjekt som kan behöva upptill en veckas träningstid. För att förkorta träningen kan GPUer användas istället för vanliga CPU enheter, samt att det numera går att använda neurala nätverk som redan genomgått en grundträning. Det är fördelaktigt att använda datacenter för arbete inom AI när möjlighet för lagring av Big Data och kraftfulla servrar ofta med GPUer finns tillgängliga.

3 Tariffer

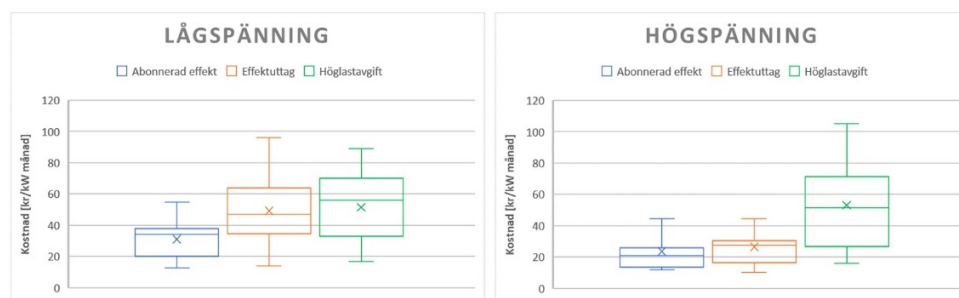
I Sverige tillämpas i huvudsak två typer el-abonnemang "säkringsabonnemang" och "effektabonnemang", om anläggningseffekt är större än 160A (111 kW) tillämpas oftast ett effektabonnemang. De datacenter som finns etablerade idag spänner över ett stort effektspann, i den här studien har vi valt att fokusera på datacenter i det överspannet när dem har större möjlighet att kunna påverka el-nätet. För effektabonnemang finns idag två prismodeller:

Abonnerad effekt: kunden avtalar med energibolaget om en tillåten toppeffekt som anläggningen får förbruka, om den uttagna effekten är högre tillkommer en överuttagsavgift för kunden.

Uppmätt effekt: kunden betalar för en uppmätt debiteringsgrundande effekt som kan fastställas på ett flertal olika sätt:

- Högsta timförbrukningen respektive månad.
- Medelvärde av de två högsta timförbrukningarna för respektive månad.
- Högsta timförbrukningen över året.
- Medelvärde av de två högsta timförbrukningarna för senaste 12 månaderna.

För vissa avtal tillkommer en höglastavgift som vanligtvis börjar gälla i november och sträcker sig till april och avser tiden mellan 06:00 till 18:00 eller 22:00 under vardagarna. Låddiagrammet i Figur 4 sammanställer effektpiserna för 20 energibolag runt om i Sverige, dels för låg-, högspänning anslutning samt abonnerad och uttagen effekt. Större skillnad finns mellan abonnerad och uttagen effekt för lågspännings jämfört med högspännings anslutning, höglastavgiften dock är ungefär den samma i de båda fallen (Termens, 2017).



Figur 4, sammanställning av effektpiserna för 20 energibolag i Sverige för abonnerad, uttagen effekt, höglastavgift samt låg eller högspänningsanslutning (Termens, 2017).

Medelpriser för lågspänningsanslutning är 29 SEK/kW för abonnerad effekt och 49 SEK/kW för effektuttag, med den stora spridningen av priser och beräkningsmetoder för prissättning är det svårt att dra några generella slutsatser. För att finna det mest fördelaktiga avtalet behövs ett års effektprofil på timbasis som både appliceras på kostnadsmodellen för en abonnerad effekt och effektuttags abonnemang för att bestämma den totala årskostnaden för de två alternativen.

Från norr till söder i vårt avlånga land skiljer årsmedeltemperaturen ungefär 11°C (-2,2°C i Kiruna och 9,5°C i Malmö) vilket givetvis påverkar den installerade effekten för kylning av datacenter. Ett kallt klimat med billig el-effekt är det mer fördelaktiga för att datacenter. Att försöka göra någon slutsats om vilken aspekt som väger tyngst är svårt när det förkommer många olika tekniska lösningar för kylning och med stora variationer i verkningsgrad.

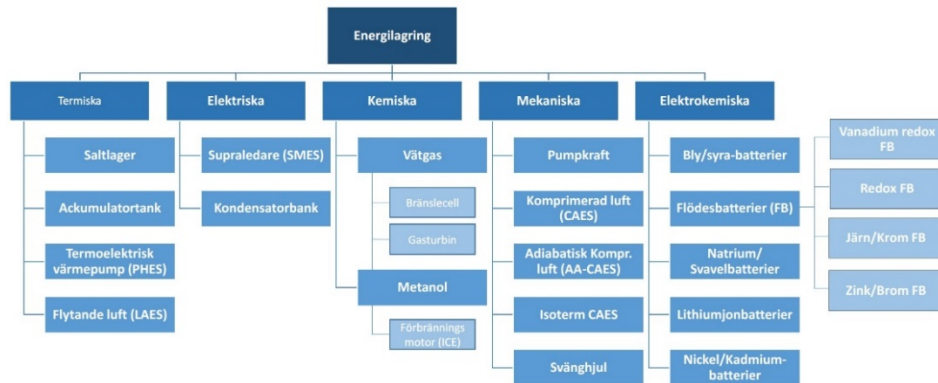
Ur ett el-näts perspektiv maximerar de stora städerna i Sverige sitt effektuttag från stamnätet flera gånger varje år, en utbyggnad för att lösa det problemet är minst 10 år bort. En fördel med datacenter är att dom inte behöver ligga i sina användares absolut närhet, i det så kallade molnet. Det är något som gynnar en lokalisering av datacenter i norra Sverige där det är nära till grön elkraft från våra älvar och ofta finns möjlighet för kraftmatningar från flera oberoende leverantörer.

I de större städerna förekommer det även ofta utrymmesbrist för att större datacenter företag ska kunna etableras sig, när de ofta vill göra anspråk på 10'000-tals m². Med det utbyggda fibernät vi har i Sverige kan bra svarstider erhållas oberoende vart i Sverige ett datacenter är lokaliserat, vilket också gynnar en lokalisering i vårt glesbebyggda norra Sverige.

Eftersom förväntningar om kostnad och tillgång till energi är viktiga faktorer vid planering och etablering av nya datacenter är det nödvändigt att kraftbolagen kommunicerar denna information till marknaden, t.ex. genom tariffer och avtal. Det kan anses troligt att transparens och långsiktighet inom detta område underlättar effektivisering och leder till win-win situationer för alla parter.

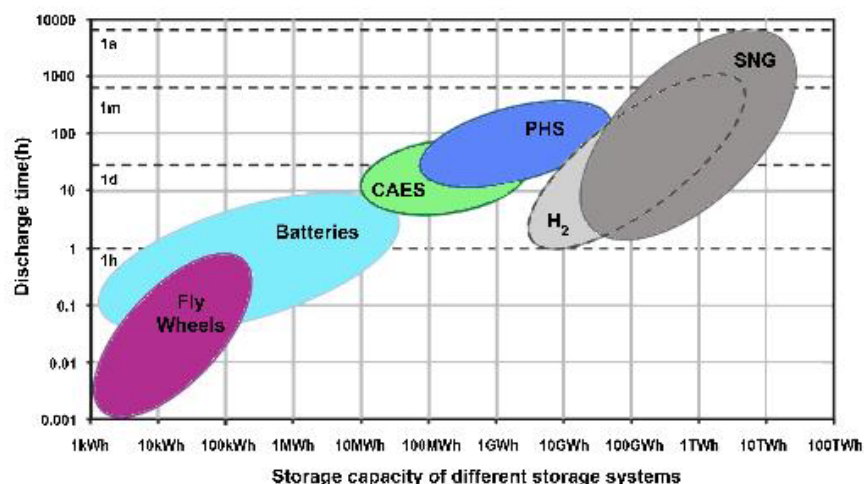
4 Effektkompensatorer

Idag finns ett flertal tekniker för energilagring med olika mognadsgrad, fysikaliska mekanismer, lagringstider, responstider osv. I Figur 5 är olika energilagartekniker (blåa fält) kategoriserade enligt deras fysikaliska mekanism (mörkblåa fält), alla tekniker har sina underkategorier (exemplifierade som de ljusblåa fälten) (Monie, 2016).



Figur 5, olika energilagartekniker (blå) kategoriserade efter deras fysikaliska mekanism (mörkblå), vissa tekniker även med sina underkategorier (ljusblå).

En viktig egenskap för ett energilager är hur mycket energi som går att lagra samt hur snabbt den går att ladda ur, i Figur 6 tydliggörs förhållandet mellan lagringskapacitet och urladdningstider för svänghjul (Fly Wheels), batterier (Batteries), tryckluftslager (CAES, Compressed Air Energy Storage), pumpvattenkraft (PHS, Pumped Hydroelectric Storage), vätgas (H_2) och syntetisk naturgas (SHG, Synthetic Natural Gas)⁴.

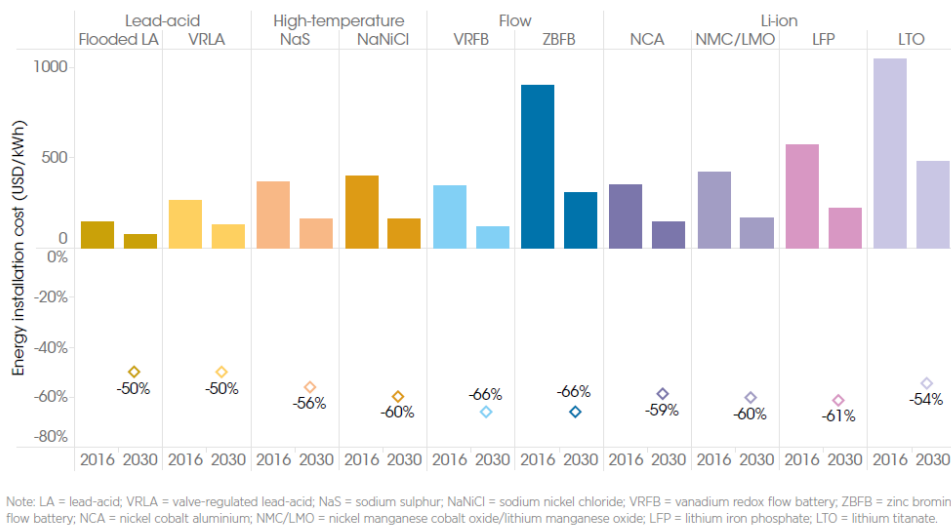


Figur 6, lagringskapaciteter och urladdningstider för energiteknikerna svänghjul, batterier, tryckluft, pumpad vattenkraft, vätgas och syntetisk naturgas.

⁴ <https://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/07/hydrogen-energy-storage-a-new-solution-to-the-renewable-energy-intermittency-problem.html>.

I de datacenter som finns idag används batterier som energilager för ett eventuellt spänningsbortfall. Den installerade lagringskapaciteten varierar, från att klara några minuter ända upp till en timme, men återspeglar den tid som behövs för att växla kraft-matning eller starta upp anläggningens reservkraftaggregat.

De vanligaste batterierna som används idag som energilager i datacenter är bly-syra (Lead-acid) av typen VRLA. På senare tid börjat finnas datacenter som använder Litium-jon batterier av typen LFP som energilager. I Figur 7 visas den prognostiserade prisnivån för olika batterisorter till år 2030, samt prisreduktionen från 2016. Som framgår är LFP batterierna betydligt dyrare än VRAL, till år 2030 bedöms LFP ligga på ungefär samma nivå som VRLA gör idag men kostnadsskillnaden kommer att vara mycket mindre (IRENA, 2017).



Figur 7, prognostiserad kostnadsutveckling (2016 - 2030) för specifik installerad batterilagringskapacitet.

De två batteritypernas egenskaper och skillnader kan summeras enligt följande:

Bly-syra

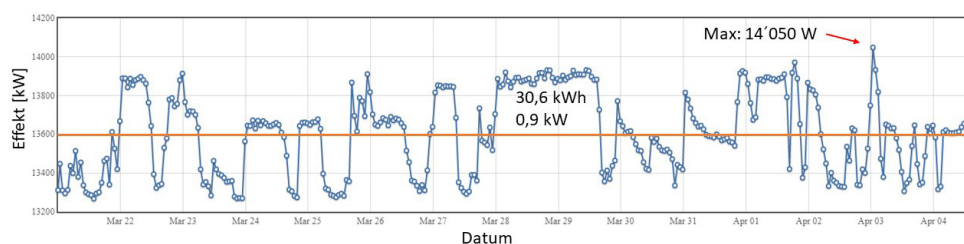
- VRAL den vanligaste typen för datacenter.
- Känslig för urladdningseffekter.
- Urladdningstid ned till 2 min (vid kortare tider tar batterierna skada).
- Efter 2000 gynnsamma urladdningscykler återstår 50% av den ursprungliga batterikapaciteten.
- Den specifik energilagringsskostanden är 150\$/kWh (1320 SEK/kWh).

Litium-jon

- LFP vanligast typen för datacenter.
- Okänslig för urladdningseffekter.
- Urladdningstider ned till 15 sek (kraft-elektroniken som begränsar).
- Efter 3'500 till 4'000 gynnsamma urladdningscykler återstår 80% av den ursprungliga batterikapaciteten.
- Den specifika energilagringsskostanden är 300\$/kWh (2'640 SEK/kWh).

För att kunna jämföra de två antar vi att Litium-jon batterierna används tills 50 % av ursprunglig kapacitet återstår (total 9'375 cykler) sedan anses dom förbrukade, vilket resulterar i en cykelkostnad på 66 respektive 28 öre/kWh för bly-syra och litium-jon batterierna. För att använda ett datacenter som energilagring mot el-nätet måste den besparade kostnaden vara större än cykelkostnaden, vilket är enklast att uppnå om datacentret använder Litium-jon batterier.

Som exempel har två veckors mätdata för datacenter modul 1 vid RISE SICS North forskningsanläggning använts (Figur 8). Om batterilagret ska användas för att minska datacentrets egna topp effekt måste det finnas större tid för i-laddning av batterierna jämfört med urladdning, dvs arean under den röda linjen i bilden måste vara densamma eller mindre än arean ovan linjen.



Figur 8, mätdata för två veckors effektförbrukning för datacenter modul 1 vid RISE SICS North i Luleå, med balans linjen (röd) som visar en uppskattad möjlig effektreduceringsnivå.

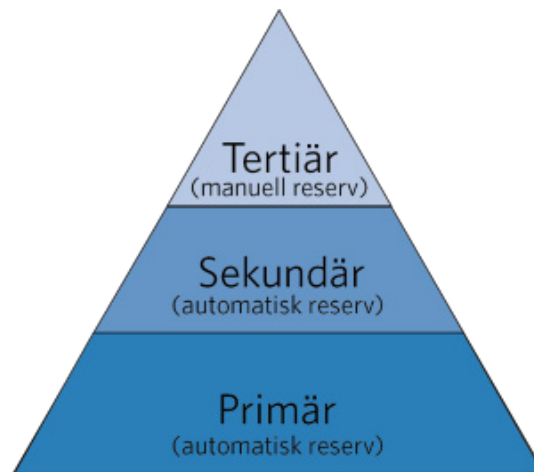
Under perioden var topp effekten 14,05 kW och en rimlig effektreduceringsnivå skulle kunna vara 13,6 kW (ungefär samma tid för i och urladdning av batterierna), baserat på de genomsnittliga el-effektkostnaderna för abonnemang och effekttuttag skulle det ge en månadsbesparing på 29 - 39 SEK. För ett datacenter på 1 MW skulle det resultera i en besparing på 25'200 - 57'600 SEK/månad, under antagandet att den uppmätta lastprofilen är direkt skalbar. För att bemöta den längsta urladdningscykeln behövs 0,9 kW under 34 timmar resulterande i 30,6 kWh, vilket för närvarande skulle vara hela det installerade lagrets kapacitet.

Lastprofilen i Figur 8 utgjordes av användning av IT-utrustningen för drift av interna system samt externa användare såsom forskare inom RISE och universitet samt privata företag. Lastprofilens utseende är således en kombination av många olika användares beteende under en godtyckligt vald tidsperiod.

Det är kostnaden för varje urladdningscykel och el-effekten som bestämmer lönsamheten och möjligheten till effektreducering. Detta förutsätter givetvis att elpris under rådande abonnemang ger incitament för att utjämna.

5 Frekvensreglering

För att upprätthålla ett stabilt elnät används reserver som reglerar mot nätfrekvensen, om frekvensen avviker från 50Hz minskar eller ökar reserverna sin belastning mot nätet beroende om det är en producerade eller konsumerade reserv. Frekvensregleringen delas upp i tre reserver enligt Figur 9 varav primär och sekundär är två automatiska reserver och tertiär är en helt manuellt kontrollerad reserv⁵.



Figur 9, frekvensreglerings triangel bestående av tre lika typer av reserver.

De tre reserverna består av följande metoder för frekvensreglering:

Primär: den reglering som används som bas och kräver en instegseffekt på 0,1 MW, beroende på frekvensavvikelse aktiverar följande metoder för att återställa frekvensen:

- FCR-N (Frequency Containment Reserv - Normal): återställer frekvensen om avvikelsen är inom 49,9 till 50,1 Hz, reserven ska kunna stegvis aktiveras till 62% inom 60 sekunder och 100% inom 3 minuter.
- FCR-D (Frequency Containment Reserv - Disturbance): återställer frekvensen om den är i spannet 49,5 till 49,9 Hz, reserven ska kunna stegvis aktiveras till 50% inom 5 sekunder och 100% inom 3 minuter.

Sekundär: den reglering som aktiveras när den primär reglering inte räcker till, bestående av:

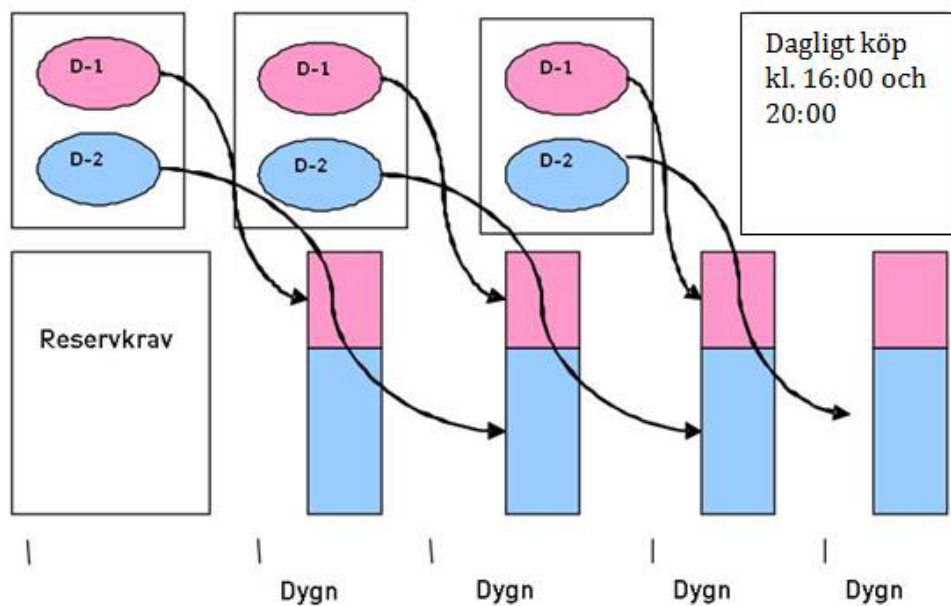
- aFRR (Automatic Frequency Restoration Reserve): en nyligen införd nordisk reserv som återställer frekvensavvikelser.

⁵ <https://www.svk.se>.

Tertiär: en reglerkraftmarknad (RKM) där effekt köps och sälj för varje timme för att frekvensen i det nordiska elsystemet ska ligga inom 49,9 till 50,1 Hz, bestående av:

- mFRR (Manual Frequency Restoration Reserv): som är reglerkraftmarkanden där frivilliga bud får läggas.
- Störningsreserven: som består av ett antal gasturbiner som går in under kortare tider mot störningar i elnätet.
- Effektreserven: en strategisk reserv med instegseffekt på 1 MW som handlas upp för vinterns behov om det skulle uppstå effektbrist.

Upphandlingsförfarandet för FCR-N baseras på två mängder; en första som upphandlas två dagar i förväg (D-2) och en andra som upphandlas en dag i förväg (D-1), dem med en maximal blocklängd på 6 timmar respektive 3 timmar. Budstopp är klockan 15:00 två dygn före driftdagen och klockan 18:00 ett dygn före driftdagen för D-2 respektive D-1 allt enligt Figur 10.



Figur 10, frekvensreglerings triangel bestående av tre lika typer av reserver.

I ett pilotprojekt mellan svenska kraftnät och Fortum Sverige AB studeras möjligheterna att använda varmvattenberedare i byggnader för frekvensreglering (FCR-D) (SvK, 2016) genom att sluta producera varmvatten när nätfrekvensen sjunker. Det sker genom att använda en special utvecklad mjukvara med tillhörande relä som installeras vid varje varmvattenberedare. Projektet genomförs under första halvåret under 2018 och resultaten presenterades under hösten 2018. Resultatet visar att aktiveringen var tillräckligt snabb för att uppfylla SvKs krav, dock var realtids rapporteringen till SvK för långsam. Överlag bedöms

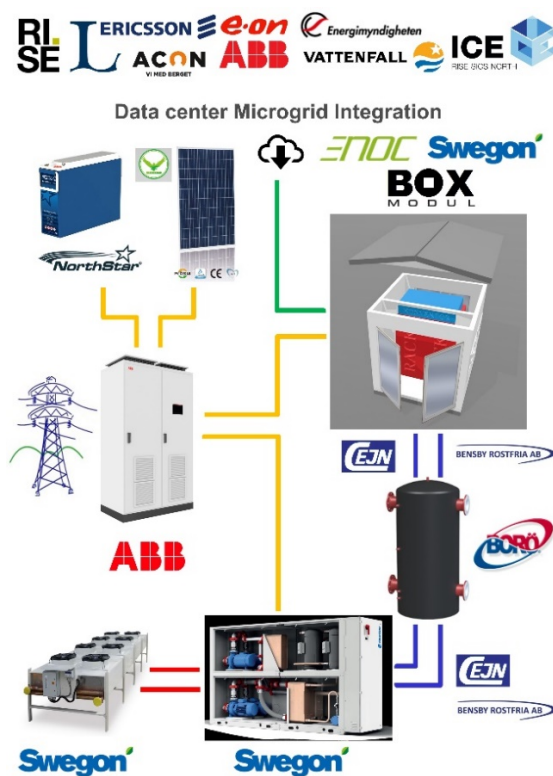
förbrukarflexibilitet kunna användas av FCR-N men kräver vissa förbättringar i SvKs IT-system för drift, handel och avräkning.

Utöver de batterier som finns i ett datacenter skulle även själva IT-effekten kunna varieras för att frekvensreglera genom att successivt stänga av aktiva servrar och på det sättet minska effektuttaget från elnätet. Inom projektet gjordes tester på hur snabbt en server kan stängas ned eller frysas (i ett strömspararläge), vilket är avgörande för att klara kravet för FCR-D.

Testets genomförande byggde på att mäta effekten för en server när den under en period instruerades att utföra energikrävande beräkningar. Mitt under dessa beräkningar skickades ett systemkommando till servern med instruktioner om att frysa pågående beräkningar och försätta sig själv i strömspararläge. Resultaten från dessa småskaliga tester visade på en effektminskning från 240 W till ca 65 W inom 5 - 10 sekunder. Testerna kan med fördel upprepas med bättre tidsupplösning för effektmätning samt med en server under realistisk/verklig användning.

6 DMI och Machine Learning

Projektets huvudsyfte var att studera möjligheterna till att använda Machine Learning för optimering av det datacenter micronät (DMI) som är under uppbyggnad vid RISE SICS North i Luleå. DMI utgör ett bra komplement till den forskningsanläggning som finns vid RISE SICS North, när den ger möjligheter till att studera olika driftscenarier och driftstrategier för användandet av förnyelsebara energikällor, batterilager och interaktion med lokalt elnät. Eftersom DMI är utrustad och enkelt kan kompletteras med fler mätpunkter kan noggrann uppföljning och utvärdering göras. I Figur 11 visas en schematisk bild över anläggningen och de parter som medverkar inom forskningsprojektet är presenterade överst i bilden. De produkter som används är delvis sponsrade av respektive företag vilket starkt har bidragit till genomförandet av projektet.



Figur 11, schematisk bild för Datacenter Microgrid Integration (DMI) anläggningen vid RISE SICS North i Luleå

Anläggningen kommer att kunna hantera följande energivariabler:

- 10 kW IT-last,
- 10 kW sol-el,
- 30 kWh batterilager,
- 22 kW kyl-effekt,
- 2m³ kyl-lager,
- ABB MicroGrid Solution, styrenheten för kontroll av energiflödena i anläggningen.

6.1 DELMÅL

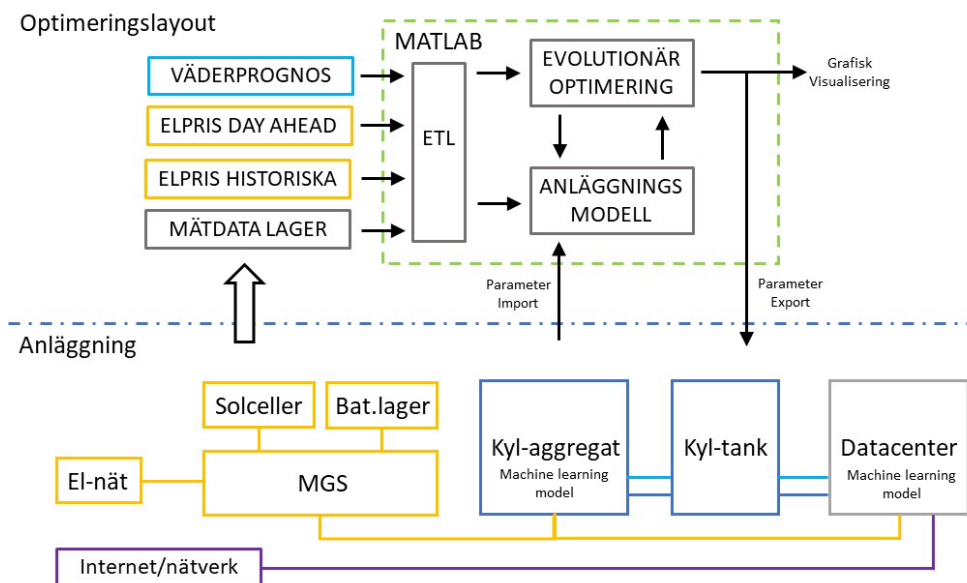
De fem delmålen beskrivna i projektansökan är ett steg i att vidareutveckla DMI projektet från att styra utifrån olika strategier till en optimerad drift med hjälp av machine learning.

Delmål 1, optimeringsstruktur: Ett förslag som författarna i nuläget bedömer möjligt visas i Figur 12. Det här projektet har till stor del fokuserat på att, med utgångspunkt i den experimentella DMI anläggningen, beskriva en realistisk lösning för ett AI-styrt datacenter och utforska dess interaktion med det lokala elnätet. Ett viktigt delmoment har varit att hitta arbetssätt för import/export och inläsning av mätdata och online data (de svarta pilarna in och ut från den gröna streckade rektangeln i figuren). Optimeringskärnan som planerar resursanvändning och kontrollerar systemet är tänkt att bestå av genetisk betingad optimering eftersom icke linjära samband i anläggningen förekommer. Här finns tillfälle att bygga vidare på de metoder Mattias (projektledare) utvecklade under sina doktorandstudier (Vesterlund, 2017). Anläggningen är väl försedd med sensorer och samlar kontinuerligt stora mängder mätdata - det finns därför goda möjligheter att bygga datadrivna modeller också för de olika komponenterna i systemet.

En modell av DMI anläggningen och dess delar har redan tagits fram vid Luleå Tekniska Universitet (Zhabelova, 2018). Denna modell, utvecklad i Matlab Simulink, tar med hela kedjan från varje servers CPU till kyltorn där det slutliga värmetransportsteget utförs. Modellen kopplar samman alla de mindre små modellerna för serverrum, servrar, kylmaskin, värmeväxlare, kyltorn och microgrid-controllern. Anläggningsmodellen i figur 12 kan baseras på detta arbete samt en ytterligare modellkomponent för kyltanken.

När en enskild komponent i systemet är svår att modellera fysikaliskt och dessutom utvecklas (åldras) över drifttiden, blir det lämpligt att skapa datadrivna Machine Learning-modeller som tränas på uppmätt mätdata.

Med en sådan struktur kan olika strategier för in- och urladdning av batterierna och kyltanken utvecklas och utvärderas, vilket kan syfta till att stabilisera elnätet eller skapa en önskad lastprofil. Optimeringen baseras på de senaste prognoserna för (el och väder) och mätdata från anläggningen, med det skapas en dynamisk optimering som justerar sig utefter de förändringar som sker.



Figur 12, schematisk bild för optimeringsrutin för DMI anläggningen. Notera att algoritmer och mjukvara endast är exempel, och kan ersättas i en tillämpning av andra metoder eller Open Source lösningar.

Delmål 2, dataimport: DMI-anläggningen kommer kontinuerligt att monitoreras för parametrar såsom temperaturer, flöden och effekter. I förekommande fall kommer även drifttillstånd övervakas. Enheterna och externa sensorer kopplas till det lokala nätverket vilket möjliggör inhämtning av data. Detta kan ske via olika protokoll där MODBUS TCP och SNMP är vanligt förekommande. Etableringen av denna struktur möjliggör insamling av data från DMI projektets olika enheter och sensorer.

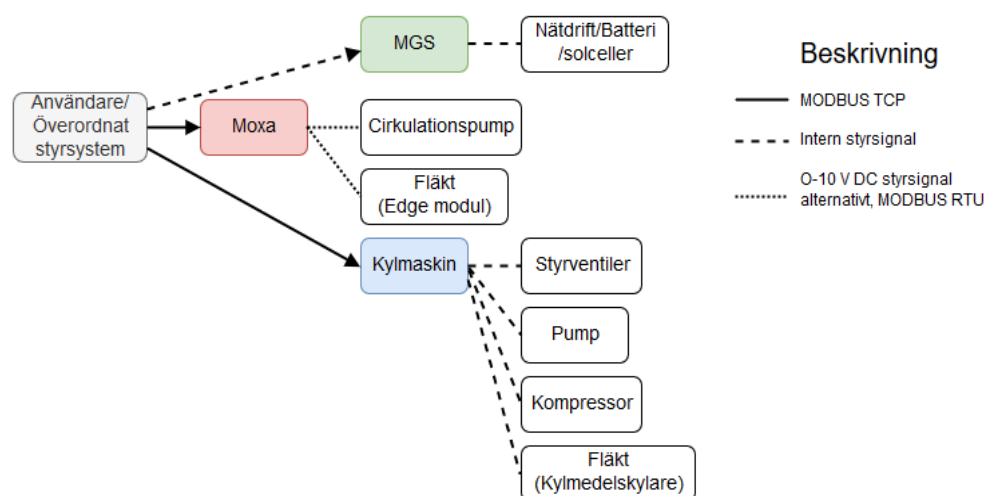
Insamlingen av data från DMI-projektet är ämnad att kopplas mot den redan befintliga insamlings- och datalagringskedjan som är implementerad i de övriga delarna av forskningsanläggningen (Gustafsson et al., 2018). Frekvensen för hur ofta data inhämtas kan ställas in för varje del/enhet i systemet. Andra delar av SICS North anläggning med liknande systemkomponenter har framgångsrikt monitorerats med intervall om 30 sekunder som standard vilket också kan implementeras i DMI anläggningen. En ännu snabbare datainsamlingsfrekvens kan möjligen åstadkommas men begränsas i så fall av eventuella ledtider i hårdvara/mjukvara i enskilda enheter. Allt data som hämtas in från DMI anläggningen sparas i en tidsseriedatabas för långtidslagring tills vidare där inget data raderas. Datainsamlingskedjan är byggd på ett skalbart sätt, alltså att datainsamlingen och långtidslagringen ska kunna växa när data växer. All data säkerhetskopieras i flera steg för att undvika att information försvinner. Mjukvarorna som används i systemet baseras på öppen källkod vilket är en kostnadsfördel. Det övergripande målet med insamlings- och datalagringskedjan är att lagra data på ett standardiserat sätt som samtidigt möjliggör enkel tillgång till data för efterbehandling och analyser. Data kan enkelt hämtas från databasen via API⁶-förfrågningar och därefter behandlas och analyseras i valfritt

⁶ Applikationsprogrammeringsgränssnitt, av engelskans Application Programming Interface.

databehandlingsprogram eller programmeringsspråk. Det här delmålens påverkan på elnätet är sekundärt men en viktig del i helheten för ett stabilare elnät.

Delmål 3, parameterexport: För att möjliggöra drift av de olika enheterna i systemet krävs också att parametrar kan skrivas till enheter över de lokala nätverket. Även här kan MODBUS-protokollet användas. Styrning och export av parametrar till enheter i systemet kan ske via vanliga programmeringsspråk såsom Python i kombination med eventuella tilläggsbibliotek. Liksom delmål 2 anses det här delmålens påverkan på elnätet sekundärt men en viktig del i helheten för ett stabilare elnät.

Styrningen av MGS-enheten sker via ABB's egna programvara Automation builder. Kylmaskinen kan styras direkt genom MODBUS TCP kommunikation. Styr signaler till ventiler, pumpar och kylmedelskylarens fläkt som i sin tur styrs internt i det egna systemet, se Figur 13, baserat på tex. givna börvärden för önskad kylvattentemperatur. Styrningen av cirkulationspumpen och fläkten i fläktkonvektorn går via en Moxa remote ethernet I/O controller (Moxa) som kommunicerar MODBUS TCP mellan användaren/styrsystemet. Prickade linjerna i Figur 13 motsvarar 0-10 V DC styr signaler mellan Moxa och fläkten samt pumpen. En användare eller ett överordnat styrsystem kan på detta vis exportera parametrar såsom börvärden, driftsform och gränsvärden till anläggningens olika enheter.



Figur 13 . Schematisk bild av parameterexport från användare till enhet samt slutligt manöverdon (pump, fläkt, kompressor osv.).

Inledningsvis planeras all IT-utrustning att styras med hjälp av en laststyrningsmjukvara som finns tillgänglig vid RISE SICS North. Last i detta avseende syftar till att ge beräkningsinstruktioner till serverns CPU samt andra jobb som i slutändan gör att servern drar mer effekt. Denna mjukvaruarkitektur möjliggör att last kan påföras IT-utrustningen samt möjlighet till schemaläggning i tid av en användare. Via ett web-gränssnitt kan användaren specificera olika typer av beräkningar samt andra stresstyper för en servers andra hårdvarukomponenter.

Delmål 4, lastbalansering: Konceptet med att flytta och planera beräkningsjobb i ett kluster av servrar utgör grund för ett helt eget forskningsområde, se exempelvis (Álvarez, 2017). En slags jobbhanteringsmekanism implementeras oftast i dess beräkningskluster där IT resurser, köade jobb, nuvarande beräkningsjobb samt dess deadline tider hanteras och distribueras. Hopar av jobb planeras in av jobbhanteringsmekanismen på ett så effektivt sätt som möjligt baserat vilka krav och strategier som implementerats, tex. utnyttja alla resurser så mycket som möjligt. Detta kan liknas vid att spela Tetris med hopar av beräkningsjobb som alla kräver olika mycket resurser och tid istället för klossar, med skillnaden att det inte går att rotera klossarna.

I ett projekt utfört vid Rutgers University kallat Parasol, utvecklades och implementerades en ny jobbhanteringsmekanism för ett datacenter med liknande komponenter och storlek som hos DMI-anläggningen (Goiri, 2011). Här utvecklades jobbhanteringsalgoritmen med målet att maximera användningen av grön el från solcellerna. Resultaten visade på en minskning av elenergikostnad med 39% vid användning av deras algoritm för jobbhantering jämfört med en traditionell schemaläggning av beräkningsjobb.

Under förutsättning att beräkningsjobb kan flyttas i tid ges möjlighet att använda datacenter för lastbalansering mot elnätet. Detta är ett första steg som redan finns tillgängligt. Många datacenter har dessutom energilagring i form av batterier. Beroende på storlek skulle dessa kunna gå in och täcka delar av datacentrets elbehov under en viss tid vilket också bidrar till att avlasta elnätet. Här står dock datacenterägaren för en ökad risk då en minskad batterireserv gör dem mer känsliga för ett plötsligt strömavbrott.

Stora energilagringsskapaciteter hos datacenter skulle ytterligare kunna agera som balanseringskraft på elnätet genom att under viss tid tillföra eleffekt till nätet från batterierna. Beslutet om en datacenterägare ska gå in och stötta elnätet som lastbalanserar kräver någon form av prognos från elnätsägaren om vilken användning man förväntar sig, vilket i sig kan uttryckas som ett priserbjudande som datacentret kan ställa mot sin kärnverksamhet, laddcykelskostnader och riskavvägningar.

Ett ytterligare alternativ för att minska belastningen på elnätet kan vara intressant om ett datacenter helt kan stänga av servrar. Tiden det tar för att frysa en server, spara pågående arbete samt stänga ner måste vara så kort möjligt om detta ska vara möjligt. Dock blir det inte lika känsligt för korta tidsbegränsningar om batterireserven kan gå in och täcka upp IT-lastens effektbehov under nedstängningsperioden. Delmål 5, prognosimport: Till den tänkta optimeringsrutinen behövs två stycken prognoser läsas in, en väderprognos och en prognos för el-priset. Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), tillhandahåller 10-dagars väderprognoser för Sverige gällande en rad parametrar. Åtkomst till den prognosen kan ske gratis via ett API där data är paketerat på ett standardiserat och strukturerat sätt i JSON eller XML-format⁷. Prognosen uppdateras en gång per timme och har högre tidsupplösning för korttidsprognoser

⁷ <https://opendata.smhi.se/apidocs/metfcst/index.html>

(prognos för varje timme upp till ca 2 dygn) och gradvis lägre upplösning längre fram i prognosen.

Vädret kommer att påverka olika delar av DMI-anläggningen och således även driften av systemet. Kylmaskinens drift kommer i hög grad påverkas av omgivningens väder i och med att den är ihopkopplad med kylmedelskylaren som är placerad utomhus. Kylmaskinens förväntade kapacitet och driftläge beror i stor utsträckning på omgivningens lufttemperatur vilket också direkt kan erhållas i prognosen från SMHI.

Systemet innehåller även solceller där den tillförda effekten också påverkas av rådande väderförhållanden. Solcellernas el-produktion och effektivitet beror på hur mycket solinstrålning som träffar solcellens yta vilket vanligen mäts i enheten W/m². Solinstrålning är inte en parameter som finns med i SMHI's 10-dagars prognos. Istället finns möjlighet att använda andra relaterade parametrar från prognosen i en statistisk modell som uppskattar solinstrålningen baserat på prognosens parametrar i kombination med historisk data för solinstrålning. De parametrar som är mest relevanta är molnighetsgraden (anges som ett heltalsvärde mellan 0-8), vädersymbol (heltalsvärde mellan 0-27 som i sin tur motsvarar ett tillstånd exempelvis 6 = molnigt, 10 = kraftiga regnskurar) och eventuellt även nederbörd (anges både som nederbördskategori och som intensitet i mm/h). En prototyp för en sådan modell har utvecklats vid RISE SICS North, men behöver valideras mot längre tidsserier av väderobservationer och historiska prognoser.

I prognosen för molnighet finns även mer detaljer där molnighetens täckningsgrad för olika nivåer i atmosfären anges. Värt att nämnas i sammanhanget är att prognosernas träffsäkerhet, även kallat prognosindex, ligger omkring 83 % för dygn 1 och 73 % för dygn 5 (SMHI, 2016). Att på ett tillförlitligt sätt kunna bedöma zden kommande väderleksutvecklingen blir allt mer viktigt för elnätet, när andelen starkt väderberoende förnybara energikällor ökar.

I ett tidigare projekt kallat Parasol utfört vid Rutgers University gjordes liknande prediktioner för förväntad tillgänglig solenergi från solcellspaneler (Goiri, 2011). I artikeln beskrivs hur deras modell är uppbyggd och vilka metoder de använde för att ta hänsyn till faktorer såsom snöfall och felaktiga prognoser. Enligt författarna till artikeln har deras metod tre fördelar; den är enkel, baserad på fritt tillgängliga data och är noggrann i nära och fram till en medellång tidshorisont vilket motsvaras av några timmar och upp till några få dagar. Den metoden kräver tillgänglighet till data för nuvarande väderförhållanden. RISE SICS North har redan idag en väderstation integrerad i datainsamlingskedjan där både historisk och nuvarande data såsom solinstrålning, temperatur, luftfuktighet och nederbörd finns tillgänglig.

El-priset för det näst kommande dygnet (day-ahead) bestäms av en mängd olika faktorer och tillgängliggörs på NORD POOLs hemsida där värden går att ladda hem manuellt för en privatperson eller företag. NORD POOL har en API-tjänst där elpriserna för nästkommande dygn kan laddas ner men är enbart tillgängligt för dess registrerade medlemmar. Ett alternativ till detta skulle kunna vara att implementera samma lösning som användes i Parasol-projektet (Goiri, 2011). Här användes en enkel modell för elpriset som estimerades till ett så kallat "on-

peak/off-peak"-pris med två perioder, en hög- och en lågkostnadsperiod. Lågkostnadsperioden antogs vara mellan 23:00 och 09:00 och högkostnadsperioden mellan 09:00 och 23:00. Det skulle vara en möjlig början att bygga upp en optimeringsrutin kring.

Ett annat alternativ skulle kunna vara att söka ett samarbete mellan forskningsinstitutet RISE SICS North och det lokala energibolaget Luleå Energi AB. Härigenom skulle kompetens- och informationsutbyte kunna ske för att åstadkomma en bättre prognosmodell för framtida elpriser samt vilka effekter det skulle kunna innebära för elnätet och möjligheten till att kapa effekttoppar.

6.2 STYRSTRATEGIER

I det sammantagna systemet som beskrivits ovan finns det utrymme för ytterligare diskussion gällande styrstrategier och hur prioriteringar påverkar driften och energikostnaderna.

- Solceller?
- Kylsystemet?
- batterilager? Exempelvis: Ska vi alltid prioritera att köra så "billigt" som möjligt även om det innebär större risker. Kan vi acceptera att vi tappar kraftmatning till IT-utrustning om strömmen går vid låg batterispänning på grund av att vi har laddat ur batterierna under natten för att det är billigt?

Vem äger algoritmerna?

Styrstrategierna och de bakomliggande algoritmerna för driften av DMI-anläggningen kan utvecklas internt vid RISE SICS North i samarbete med forskare vid Luleå Tekniska Universitet. Forskningsinstitutet har för avsikt att publicera eventuellt material gällande styrstrategier/algoritmer som forskningsartiklar/konferensbidrag om så är möjligt. Verksamheten verkar för öppenhet inom branschen och vill tillgängliggöra eventuellt nya rön för andra datacenter-ägare genom spridning av nya metoder.

6.3 PREDIKTION AV ELPRISER

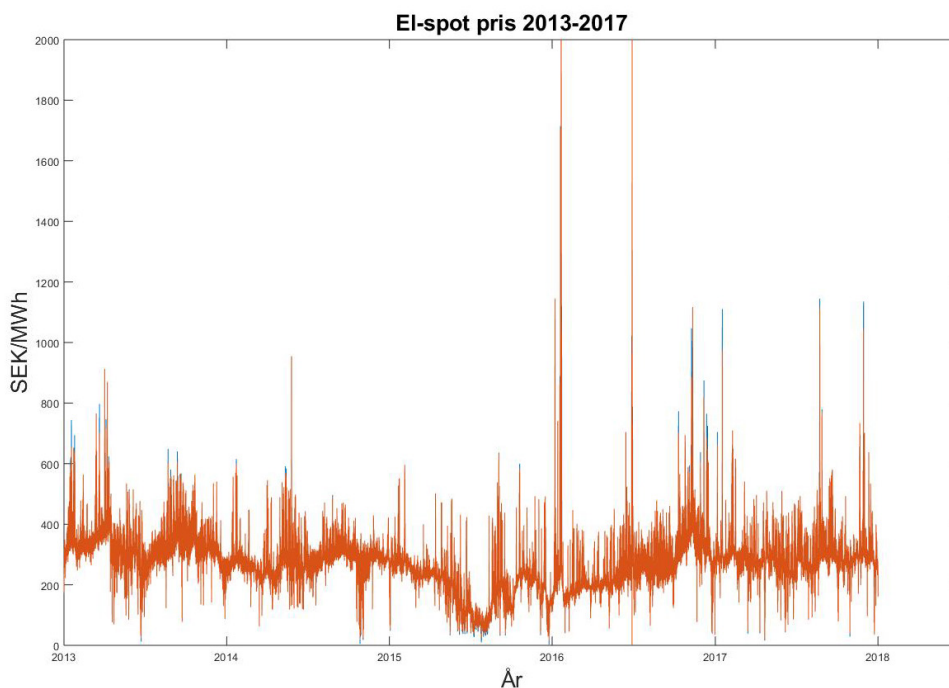
Day-ahead avser endast el-priser för det kommande dygnet och för att göra längre prognoser har MATLABs "Neural Network Toolbox" och "Statistics and Machine Learning Toolbox" använts. För att träna ML-modellerna har historiska el-priser på timbasis för åren 2013 - 2017 använts och 2018 för utvärdering, i Tabell 1 tydliggörs noggrannheten mellan olika kategorier och tekniker (där värdet 1 motsvarar fullständig överensstämmelse med verkliga data).

Tabell 1, noggrannheter för olika kategorier och tekniker av machine learning för att representera el-pris utvecklingen mellan år 2013 och 2017.

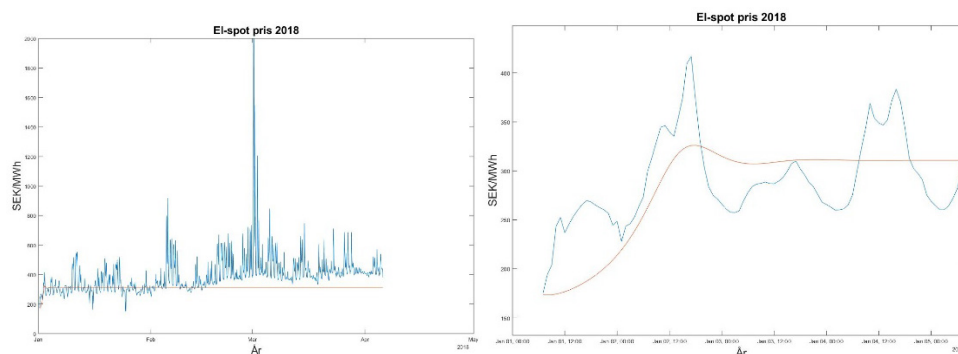
Regression Learner	Cross validation			
	Fine Tree		0,84	
	Medium Tre		0,75	
	Linear SVM		0,02	
	Quadratic SVM		Ingen konvergens	
	Cubic SV		Ingen konvergens	
	Fine Gaussian SVM		0,41	
	Gaussian Process Regression, Rational Quadratic GPR		Ingen konvergens	
	Gaussian Process Regression, Squared Exponential GPD		0,55	
Neural Net Fitting		Levenberg-Marquardt	Bayesian Regularization	Scaled Conjugate Gradient
		0,64	0,66	0,60
Neural Net Time series	Nonlinear Autoregressive with External Input (NARX)	0,96	0,97	0,95
	Nonlinear Autoregressive (NAR)	0,96	0,97	0,91
	Nonlinear input output	0,63	0,65	0,58

Som tydliggörs återfinns bästa överensstämmelse med autoregressiva tidsseriemodeller av typen NARX och NAR, av dessa två kategorier kan NAR anses mer lämplig eftersom data endast består av en indata variabel (tid och datum) och output (el-pris). I Figur 14 har en NAR med Bayesian Regularization (röd linje) använts för att återskapa el-priser för perioden 2013 till 2018 (blå linje) vilket överensstämmer till 97%.

Modellen har sedan använts för att prognostisera priser för 2018 i Figur 14 - det är tydligt att kortsiktiga prisvariationer inte kan förutsägas med precision. Den högra bilden visar emellertid att modellen till en början följer den genomsnittliga trenden i prisutvecklingen relativt väl men sedan planar ut mot en långsiktigare medelnivå.

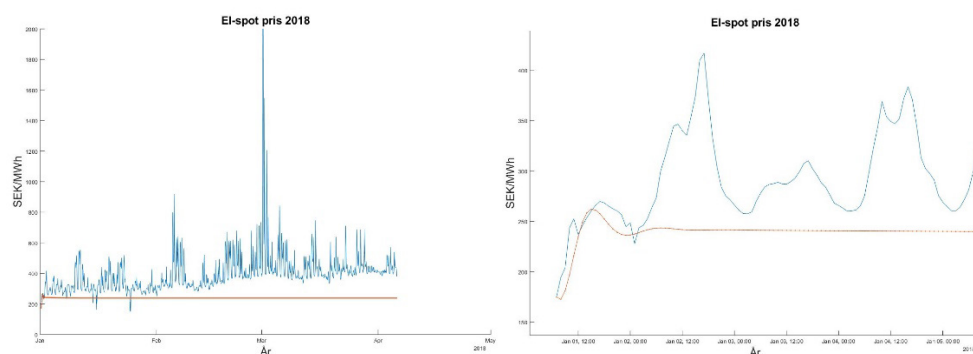


Figur 14 , el-priser för perioden 2013 till 2018, blå linje verkligt utfall och rödlinje återskapad prisutveckling med NAR och Bayesian Regularization.



Figur 15 , till vänster: prognostiserat el-prisutveckling från ML modell (röd linje) och verkligt utfall (blå linje) för 2018, till höger: tydliggörs den inledande tidsperioden där en insvängning och stabilisering kan ses.

Efter dialog med Mathworks⁸ föreslogs användandet av "deep learning" och Long Short-Term Memory" (LSTM) i stället för ML-NAR . Figur 15 ger ett exempel på prediktering av elpriser för 2018. Denna typ av modeller verkar inte ge någon fördel gentemot de enklare tidsseriemodeller vi använt. Modellträningen på en standard laptop tog drygt två timmar, vilket är relativt lång tid - om förfarandet upprepas skulle det vara lämpligt att genomföra träningen på en kraftfullare dator eller GPU i ett datacenter.



Figur 15, till vänster: prognostiserat el-pris utveckling från DL modell (röd linje) och verkligt utfall (blå linje) för 2018, till höger: tydliggörs den inledande tidsperioden där en insvängning och stabilisering kan ses.

Som synes fungerar varken machine learning med enklare tidsseriemodeller eller deep learning något vidare för att göra precisa prognoser för elprisutvecklingen. Detta är i grund och botten ett svårt problem, eftersom prissättning på en fri marknad påverkas av kortsiktiga variationer i tillgång och efterfrågan som är svåra att förutsäga och bestäms av nyheter och dylikt.

Slutsatsen är att ML är ett bra verktyg att använda inom en tränade volymen vilket passar bra för modellering av fysiska/logiska enheter inom DMI, men sämre på att göra bedömningar av prognos utvecklingar där ett stort inslag av slumpmässighet förekommer. Om inte ett fast el-pris är förhandlat mellan datacenter ägaren och leverantören kan elhandels trenden på Nasdaq OMX användas.

⁸ Emelie Andersson och Antti Loytynoja vid Mathworks.

7 Slutsatser

Genom att använda den teknik som finns i ett datacenter finns olika möjligheter för att skapa positiv elnätsnytta. De är ur ett datacenterägar-perspektiv listade nedan:

- Effektutjämning: genom att minska den egna toppeffekten kan kostnadsbesparingar göras på effektabonnemanget, samtidigt som en jämnare last mot elnätet erhålls.
- FCR-D budgivning: genom att lägga bud till SvK för frekvensreglering kan datacenterägaren få extra inkomst förutsatt att budet blir avropat och är av tillräcklig omfattning. Det kräver dock att anläggningens UPS modifieras eller ersätts för att kunna kommunicera med SvKs IT-system och följa den linjära effektavlastningen som krävs.
- Frysning av servrar: att frysa servrar med hög belastning bedöms vara det minst attraktiva om det samtidigt skapar ett inkomstbortfall, men skulle kunna bli aktuellt när hög flexibilitet föreligger i schemaläggning eller om de ekonomiska incitamenten för lastbalansering är tillräckliga.

Genom ett tätt samarbete mellan datacenterägare och energibolag finns goda möjligheter till att skapa synergieffekter för elnätet, genom att minska effektopparna och öka nyttjandegraden av nätet.

Den föreslagna optimeringsstrukturen skulle förslagsvis ägas och utvecklas av datacenterägaren, men användas som verktyg av det lokala energibolaget för att finna de driftfall som behövs för att gynna elnätet.

I förlängningen med mer förnybara väderberoende energikällor i de lokala elnäten ställs större krav på balansrapporteringen mot SvK, genom att använda AI och datacenter som del av ett aggregerat område finns möjlighet att kompensera mot dessa variationer.

8 Fortsatt arbete

Som tydliggjordes i det här arbetet är att det finns stora tariffprissättningsvariationer, en fundering som uppstått under projektets gång är hur dem påverkar driften av ett datacenter?

Tidigare Energiforsk-projekt som beaktat tariffen lyfter behovet av att kunna erbjuda rätt tariff till rätt kund, på det sättet skapa systemnytta som både gynnar nätet och kollektivet på kort- och långsikt (Helbrink et al., 2015), (Helbrink et al., 2017).

Idéer och skisser finns framtagna för en gemensam ansökan till Energiforsk programmet "Digitalisering och IT-säkerhet" och Energimyndighetens "SamspeL". Med syftet att studera olika tariffers inverkan på nätnyttjande för AI drivna datacenter samt hitta tariffen som gynnar båda parter och leder till effektivisering.

9 Referenser

Gustafsson, Jonas. Fredriksson, Sebastian. Nilsson-Mäki, Magnus. Olsson, Daniel. Sarkinen, Jeffrey. Niska, Henrik. Seyvet, Nicolas. Minde, Tor Björn. Summers, Jonathan. *A demonstration of monitoring and measuring data centers for energy efficiency using opensource tools*. Association for Computing Machinery. e-Energy conference (2018). June 12-15, 2018. Karlsruhe, Germany.

Goiri, Íñigo. Hague, Md E. Le, Kien. Beauchea, Ryan. Nguyen Thu D. Guitart, Jordi. Torres, Jordi. Bianchini Ricardo. *Matching renewable energy supply and demand in green datacenters*. Ad Hoc Networks 25 (2015) 520 - 534.

Goiri, Íñigo. Hague, Md E. Le, Kien. Beauchea, Ryan. Nguyen Thu D. Guitart, Jordi. Torres, Jordi. Bianchini Ricardo. *GreenSlot: Scheduling Energy Consumption in Green Datacenters*. (2011).

Heddeghem, Ward Van. Lambert, Sofie. Lannoo, Bart. Colle, Didier. Pickavet, Mario. Demeester Piet. *Trends in worldwide ICT electricity consumption from 2007 to 2012*. Computer Communications 50 (2014) 64 - 76.

Helbrink, Jakob. Lindén, Magnus. Nilsson, Martin. Andersson, Mikael. *Syntes av eltariffer - Simulering och analys av ett flertal tariffmodeller ur ett kostnadsperspektiv*. Energiforks, Rapport 2015:170.

Helbrink, Jakob. Lindén, Magnus. Nilsson, Martin. Pogosjan, Daniel. Ridenour, Jonathan. *Kategorisering av elkunder utifrån förbrukarprofil - Möjligheter för bättre prissättning och ökad kundkännedom*. Energiforks, Rapport 2017:356.

IRENA. *Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030*. International Renewable Energy Agency (2017).

Monie, Svante W. *Energilagring för distribuerad produktion av solcellsel: Energilagringstekniker som kan öka nätets acceptansnivå för distribuerad produktion*. Uppsala Universitet (2016).

Oró, Eduard. Depoorter, Victor. Garcia, Albert. Salom, Jaume. *Energy efficiency and renewable energy integration in data centers. Strategies and modelling review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 42 (2015): 429 - 445.

Rong, Huigui. Zhang, Haomin. Sheng, Xiao. Li, Canbing. Hu, Chunhua. *Optimizing energy consumption for data centers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 58 (2016) 674 - 691.

SMHI. *2016 Årsredovisning Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SMHI*. (2016).

Svk. *Slutrapport pilotprojekt Flexibla hushåll. Svenska Kraftnät. SvK 2016/1688* (2016).

Termens, Josep. *Effekthantering i lokaler: Påverkan på eleffektoppar genom elbilsladdstationer och energilager*. BELOK (2017).

Vesterlund, Mattias. *District heating system analysis and challenges within the urban transformation of Kiruna*. Doktorsavhandling Luleå Tekniska Universitet 2017.

Zhabelova, G., Vesterlund, M., Eschmann, S., Berezovskaya, Y., Vyatkin, V., & Flieller, D. (2018). *A Comprehensive Model of Data Center: from CPU to Cooling Tower*. IEEE Access, 6, 2169-3536. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875623>

Gonzalo P., R. (2017). *HPC scheduling in a brave new world (PhD dissertation)*. Umeå universitet, Umeå.

AI FÖR OPTIMERING AV DATA-CENTER MICROGRID INTEGRATION

Artificiell intelligens och maskininlärning kan användas för live optimering av ett datacenter kopplat till ett mikronät med batterilager. Syftet är att minska driftkostnaden samtidigt som effektförbrukningen jämnas ut.

Optimeringen bör ta hänsyn till parametrar som väderprognos, el-prisutveckling, lastprediktion och fysikaliska samband i anläggningen.

Genom att schemalägga beräkningar och planera användning av batterilager kan datacenters effektförbrukning utjämnas och toppar kapas. Batterilagret kan också användas för frekvensreglering mot elnätet även om existerande system för handel inom frekvensreglering kan behöva förbättras.

Frekvensreglering av typ Frequency Containment Reserve – Disturbance, FCR-D, anses mest lämplig i de här sammanhangen. Det bedöms vara fördelaktigt att använda litium-jon batterier för reglering av effekt och frekvens.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se