

Kandidatexamensarbete, Högscoleingenjörprogrammet – Elektronik
Institution för systemteknik, Linköpings universitet, 2022

Påverkan av elbilar på Sveriges transmissionsnät 2030

Omid Najafi och Elias Rajabi



Examensarbete, Högskoleingenjörsprogrammet – Elektronik

Påverkan av elbilar på Sveriges transmissionsnät 2030

Omid Najafi och Elias Rajabi
LiTH-ISY-EX-ET--22/0519--SE

Handledare:

Arvind Balachandran
Fordonssystem, ISY
Linköpings universitet

Examinator:

Christofer Sundström
Fordonssystem, ISY
Linköpings universitet

Avdelningen för fordonssystem

Institutionen för systemteknik

Linköpings universitet

SE-581 83 Linköping

Copyright 2022 Omid Najafi och Elias Rajabi

Sammanfattning

Antal nyregistrerade laddbara personbilar ökar märkbart för varje år. Enligt en prognos kommer cirka 2.5 miljoner laddbara bilar vara i trafik i Sverige år 2030. Detta motsvarar hälften av personbilsflottan idag.

Ökningen av laddbara bilar sker framför allt i elområden SE3 och SE4. Detta påverkar hur transmissionsnätet påverkas i framtiden där mängden effekt som ska transmittas från norr till södra landet ökar om omständigheterna i nätet är samma som idag. I detta examensarbete uppskattades först effektökningen orsakade av elbilar år 2030 för de nämnda elområdena. Sedan modellerades transmissionsnätet i SE3 och SE4 för att undersöka hur denna effektökning påverkar transmissionsnätet och dess förluster.

Resultatet visade att effektökningen kommer att belasta transmissionsnätet hårdare än idag. För effektöverföring mellan SE2 och SE3 passeras den maximala överföringskapaciteten redan idag för vissa timmar av året. Resultatet i denna rapport visar att sådana timmar kommer att vara betydligt fler för år 2030 och förlusterna kommer att öka. Det visade sig att för SE4 kommer den maximala överföringskapaciteten räcka för år 2030.

Abstract

The number of newly registered rechargeable passenger cars in Sweden increases noticeably every year. According to a forecast, there will be around 2.5 million cars in traffic in 2030. This corresponds to half of the passenger car fleet today.

The increase in rechargeable cars takes place above all in electricity areas: SE3 and SE4. This affects how the Swedish national grid is affected in the future, where the amount of power to be transmitted from the north to the south of the country increases if the conditions in the grid are the same as today. In this bachelor thesis, the power increase caused by electric cars in 2030 was first estimated for the mentioned electricity areas. Then the power transmission grid was modeled for SE3 and SE4 to investigate how electric cars will affect the national grid and its losses.

The result showed that the power increase will load the national grid more heavily than today. For power transmission between SE2 and SE3, the maximum net transfer capacity is already exceeded for certain hours of the year. The result in this report shows that such hours will be significantly more for the year 2030 and the losses in the grid will increase. It turned out that for SE4, the maximum transmission capacity will be sufficient for the year 2030.

Förord

Vi är tacksamma att vår examinator Christofer Sundström gav oss möjligheten till att utföra vårt examensarbete på Liu. Vi vill också tacka vår handledare Arvind Balachandran för hans hjälp.

Innehåll

1	Introduktion.....	1
1.1	Syfte	2
1.2	Frågeställning	2
1.3	Avgränsningar och antaganden	3
2	Teori	4
2.1	Sveriges elnät	4
2.2	Elområde	5
2.3	Transmissionsteknik.....	6
2.4	Aktiv effekt och reaktiv effekt	7
2.5	Luftledning	9
2.6	Ledare.....	9
2.7	Transmissionsnätets parametrar	10
2.7.1	Resistans	11
2.7.2	Induktans i ledningar	12
2.7.3	Kapacitans	13
2.8	Ekvivalent schema.....	14
2.9	Aktiva och reaktiva effektförluster	15
2.10	Balans i kraftsystemet.....	16
2.11	Seriekompensering	16
2.12	Surge impedance loading.....	17
2.13	Elbilar	19
3	Metod	21

3.1	Introduktion.....	21
3.2	Utförande.....	21
3.3	MATLAB skript	21
3.4	Modellering av transmissionsnätet.....	24
3.5	Simscape modellering	25
4	Resultat	27
4.1	Simuleringar för elbilar	27
4.2	Simscape resultat.....	30
5	Diskussion.....	32
5.1	Resultat.....	32
5.2	Metod	33
5.3	Eventuella förbättringar i framtiden.....	34
6	Slutsats	35
7	Referenser	36
8	Appendix A	39
9	Appendix B	41

Notation

I tabellen nedan beskrivs förkortningar och ord.

<i>FÖRKORTNING</i>	<i>BETYDELSE</i>
SVK	Svenska kraftnät
WLTP	Körcykel för att fastställa ett fordons bränsleförbrukning.
NORD POOL	Börsmarknad för el i Norden
NTC	Maximal överföringskapacitet i nätet
HVDC	Högspänd likström
VAR	Voltampere reaktiv är en enhet som används för att mäta reaktiv effekt i växelströmskretsar
VA	Voltampere är måttenhet för skenbar effekt
W	Måttenhet för elektrisk effekt
NOD	En punkt i ett kraftsystem som ansluter en eller flera ledningar
HUVUDSPÄNNING	Spänning mellan två faser i ett trefasssystem

1

Introduktion

Sveriges omfattande klimatmål är att ha noll nettoutsläpp av växthusgaser senast år 2045 enligt den klimatpolitiska handlingsplanen [1].

Inrikes transporter står för ca en tredjedel av de totala växthusgasutsläppen. Ett etappmål som ingår i det övergripande klimatmålet är att reducera utsläppen från inrikes transporter med minst 70 procent senast år 2030 gentemot år 2010 [1, S.30]. År 2017 stod personbilar för 67 procent av utsläppen inom transportsektorn [1, S.17]. Elektrifiering av personbilar i Sverige är ett stort steg för att fasa ut fossila bränslen. Idag finns det cirka 330 000 laddbara personbilar i Sverige [2] och antalet nyregistrerade laddbara bilar fortsätter öka. Detta innebär ett ökande effektuttag från Sveriges elnät som i sin tur kräver att elnätet har kapaciteten att överföra och leverera den effekt som efterfrågas.

I norra Sverige produceras det mer el än det som förbrukas och det motsatta gäller för södra delen av Sverige. När effektbehovet i dessa områden växer, betyder det att mer ström behöver transporteras från norr till söder och då även förlusterna ökar i nätet. Kan kraftnätet på transmissionsnivå klara av belastningen som laddbara bilar orsakar år 2030?

1.1 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka om Sveriges transmissionsnät är tillräckligt utrustat för att tillgodose effektbehovet i SE3 och SE4 år 2030 då antal laddbara bilar har ökat jämfört med idag.

Vidare ska Sveriges transmissionsnät modelleras för elområden SE3 och SE4 för att sedan analysera hur aktiva och reaktiva effektförluster påverkas år 2030 jämfört med idag.

1.2 Frågeställning

Hur påverkas transmissionsnätet vid ökande antal laddbara personbilar för 2030?

Hur påverkas överföringsförluster av det ökande antal elbilar 2030?

1.3 Avgränsningar och antaganden

- Det antas att alla laddbara bilar kommer vara elbilar år 2030
- Examensarbetet har bara tagit hänsyn till elbilar i SE3 och SE4
- Antal elbilar i detta arbete baseras på prognoser
- Fokus ska ligga på aktiva och reaktiva överföringsförluster i elområden: SE3 och SE4
- Vid modelleringen av transmissionsnätet försummas 220 kV ledningar och HVDC länken i södra landet
- Det antas att hela effektökningen som elbilar ska belasta SE3 och SE4 med i framtiden (2030) kommer från SE2 och att ingen hänsyn tas till elproduktion i SE3 och SE4

2

Teori

I detta kapitel tas teorin och relaterat arbete upp. Först presenteras Sveriges transmissionsnät och hur den är uppbyggd på grundnivå. Sedan kommer avsnitt om ledare och modeller för ledningar.

2.1 Sveriges elnät

Det svenska elnätet består av transmissionsnät och distributionsnät samt utlandsförbindelser. Spänningen i transmissionsnätet är 400 kV eller 220 kV. Distributionsnätet i sin tur består av regionnät och lokalnät. Spänningen i det regionala nätet är 130 kV och spänningen i lokalnätet är 40 kV eller lägre.

Transmissionsnätet var tidigare känd som stamnät. Transmissionsnätet överför stora mängder effekt från stora elproducenter till regionalt och distributionsnät. Den korsar hela landet från norr till söder och förbinder Sveriges elnät med andra länders elnät. Sveriges elnät är sammankopplad med de omgivande länderna genom så kallad utlandsförbindelser och det handlar antigen om växelströmförbindelser eller likströmsförbindelser. Växelströmförbindelser används när elnäten i båda länderna är i fas och ingår i samma synkronområde [3].

2.2 Elområde

Ett sätt att hantera begränsningar i ett lands transmissionsnät så kallad flaskhalsar är att indela landet i olika elområden. Sverige delas in i 4 elområden som framgår av figur 1. I Sverige uppstår exempelvis flaskhalsar mellan norr och söder. Anledningen till detta är att det produceras mer el i norr än vad det förbrukas samtidigt som motsatsen sker i den södra delen av landet.

Flaskhalsar förekommer när nätet inte har kapaciteten att transportera den efterfrågade elen från marknaden [4].

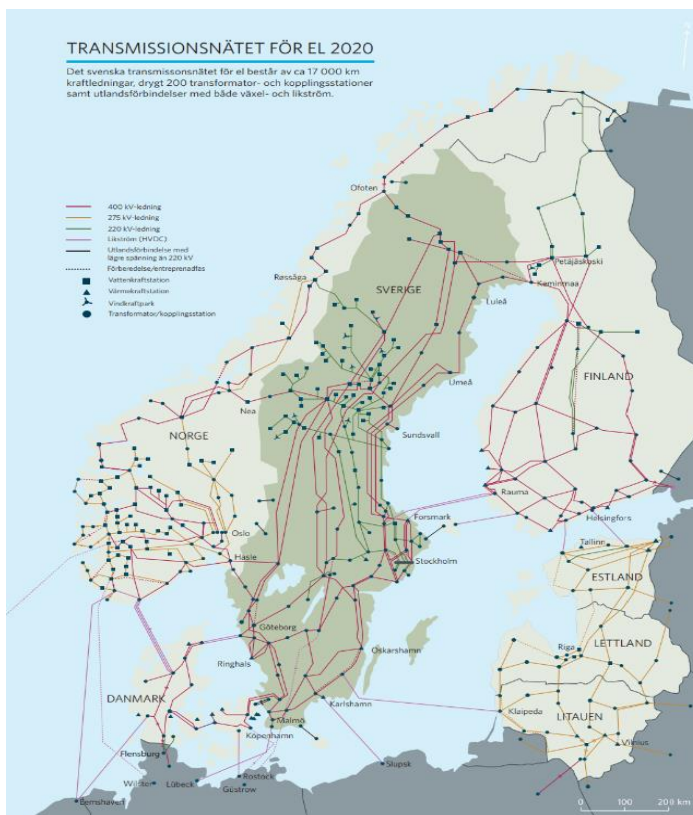


Figur 1: Visar Indelning av Sverige i fyra elområden [4].

2.3 Transmissionsteknik

I Sverige, är transmissionsnätet grundat på växelströmsteknik, dvs att den är dominerande tekniken i elkraftsystemet. Transmissionsnätet förstärks oftast med 400 kV luftledningningar för att uppnå ett kostnadseffektivt, driftsäkert och miljövänligt el-transportsystem [3].

Trefjärdedelar av växelströmsledningningar i nätet är 400 kV och resten 220 kV. En hög spänningsnivå är både bra för miljön och är effektiv dvs stor mängd el kan överföras [5].



Figur 2: Karta över Sveriges transmissionsnät och förbindelser med andra länder [24].

2.4 Aktiv effekt och reaktiv effekt

För en växelströmskrets definieras den aktiva effekten som medelvärdet av momentaneffekten. För ett symmetriskt trefassystem beräknas den aktiva effekten enligt [6]:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{W}) \quad (1)$$

Där P står för aktiv effekt, U står för huvudspänning och I står för linjeström. $\cos(\varphi)$ kallas för effektfaktorn och φ kallas för fasvinkel och är fasförskjutningen mellan strömmen och spänningen.

Den reaktiva effekten för ett symmetriskt trefasigt system beräknas enligt ekvation 2 [6].

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{VAR}) \quad (2)$$

Där Q står för reaktiv effekt. Begreppen reaktiv effekt och reaktiv effektförlust (beskriv i avsnitt 2.9) är hjälpstorheter som har införts för att underlätta beräkningar [7].

Ett annat begrepp inom elkraftsammanhang är skenbar effekt som för ett symmetriskt trefassystem beräknas enligt ekvation 3 [6].

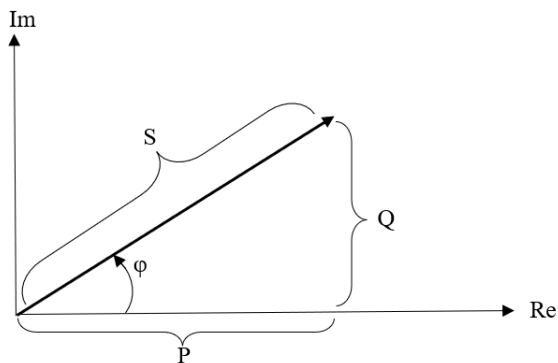
$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (\text{VA}) \quad (3)$$

Där S är den skenbara effekten.

Figur 3 visar samband mellan den skenbara effekten, aktiv effekt, reaktiv effekt och fasvinkel [6]. Matematiskt kan dessa samband skrivas som:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (4)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (5)$$



Figur 3: samband mellan aktiv effekt, reaktiv effekt, skenbar effekt och φ .

2.5 Luftledning

Luftledningar är byggda av bland annat isolatorer, ledarmaterial och stolpar.

2.6 Ledare

Aluminium har idag ersatt koppar som det mest vanligaste ledarmaterialet när det gäller luftledningar. Aluminiumbaserad ledare är både billigare och lättare trots att den behöver större tvärsnittsarea för att ge lika stora förluster jämfört med ledare konstruerade av koppar [8, s.173].

En av de vanligaste typerna av ledare är ferallinor (FeAl) som på engelska kallas *ACSR* och står för *aluminium conductor steel reinforced*. En ferallina består av aluminiumtrådar som innesluter stålsträngar. Ledaren är på detta sätt förstärkt. Denna ledartyp har pga. värmeöverföring ingen isolering och är oisolerad [8, s.173]. För 400 kV kraftledningar används exempelvis 3 linor per fas dvs en triplexledare. Falcon och Orre med en tvärsnittsarea på 910 mm^2 är kodnamn på ferallinor med olika stålareor [9, s.228]. Det finns andra linarrangemang per fas som kallas simplex (en lina), duplex (två linor) och quadruplex (fyra linor).

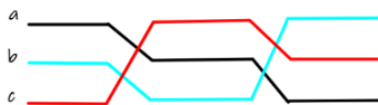


Figur 4: illustrerar tvärsnittsarea på en ferallina med 39 trådar, de gråa och vita cirkelarna representerar stål respektive aluminiumtrådar.

2.7 Transmissionsnätets parametrar

I detta avsnitt behandlas transmissionsnätets grundläggande parametrar: serieresistansen R , serieinduktans L , shuntkapacitans C och shuntkonduktansen G för luftledningar. Serieresistansen orsakar aktiva effektförluster (I^2R), serieimpedansen som består av serieinduktansen och serieresistansen ger upphov till spänningsfall längsmed ledningen. Shuntkonduktansen står för U^2G förluster i nätet där U står för spänning. I luftledningar försummas oftast shuntkonduktansen [8, s.161].

För att ledarna ska ha samma induktans och kapacitans längsmed hela ledningen skruvas kraftledningen [9].



Figur 5: princip för skruvning av faserna a, b och c.

2.7.1 Resistans

Likströmsresistansen i en ledare beräknas enligt följande formel [8]:

$$R = \frac{\rho_T l}{A} \Omega \quad (6)$$

Där ρ_T = ledarens resistivitet vid temperaturen T

l = ledarens längd

A = ledarens tvärsnittsarea

För aluminium används resistiviteten $28.3 \Omega \text{ mm}^2$ vid temperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [7]. Om antal linor är mer än en per fas, används den parallella resistansen av dessa linor som resistans per fas [6]. Växelströmsresistansen för ledningar är maximalt några få procent större än likströmsresistansen [8].

2.7.2 Induktans i ledningar

Det finns flera faktorer som kan påverka induktansen i ledningar. Dessa faktorer är bland annat ledarens storlek och diameter, fasavståndet och antal linor per fas [7]. Induktans för en skruvad trefasledning beräknas enligt följande [8]:

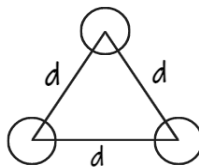
$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{D_{eq}}{D_{SL}} \right) \text{ H/m per fas} \quad (7)$$

Där D_{eq} står för GMD (*geometric mean distance*) och D_{SL} är GMR (*geometric mean radius*). För en triplex arrangemang räknas D_{eq} genom ekvation 8 [8].

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}} \quad (8)$$

$$D_{SL} = \sqrt[9]{(D_s \cdot d \cdot d)^3} = \sqrt[3]{D_s \cdot d^2} \quad (9)$$

I ekvation 8 representerar D_{xx} under rottecknet avståndet mellan två faser. I ekvation 9, står d för avståndet från centrum av en lina till centrum av en annan lina inuti en fas och D_s är ett konstantvärde (GMD) för ledartypen Falcon 910 mm^2 som kan hämtas exempelvis från [8].



Figur 6: konfiguration för en triplex ledare.

2.7.3 Kapacitans

för att beräkna kapacitansen för en balanserad triplex ledare, utnyttjas ekvation 10 [8].

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{D_{sc}}\right)} \text{ F/m} \quad (10)$$

$$D_{sc} = \sqrt[3]{r \cdot d^2} \quad (11)$$

Där står r för ledarens radie, d är avståndet mellan linorna i en fas, epsilon är dielektricitetskonstanten [8] och D_{eq} beräknas enligt ekvation 8 i föregående avsnitt.

2.8 Ekvivalent schema

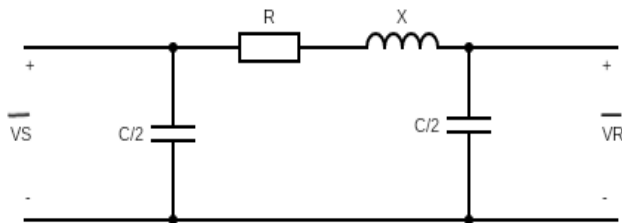
kraftledningar klassificeras efter hur långa de är:

Korta ledningar: ledningar kortare än 80 km.

Medellånga ledningar: ledningar vars längd är mellan 100 km och 300 km.

Långa ledningar: ledningar som har en längd större än 300 km [6]. Ett alternativ för att representera långa ledningar är att seriekoppla sektioner av kortare ledningar[10, s.208].

En balanserad trefasledning som är symmetrisk kan modelleras enligt en så kallad ekvivalent schema per fas [6].



Figur 7: visar ekvivalent π schema per fas för en medellång trefasledning med försummad konduktans.

2.9 Aktiva och reaktiva effektförluster

Aktiva effektförluster i en trefasig ledning beror på ledarens resistans R och strömmen I genom den [7].

$$P_f = 3RI^2 = R \left(\frac{P}{U} \right)^2 + R \left(\frac{Q}{U} \right)^2 \quad (12)$$

I ekvationen ovan står P_f för aktiva effektförluster, R står för resistans per fas, P är aktiv effekt och Q står för reaktiv effekt enligt avsnitt 2.4.

Reaktansen X i ledningar ger upphov till reaktiva effektförluster som ökar med strömmen i kvadrat enligt ekvation 13 [7].

$$Q_f = 3XI^2 = X \left(\frac{S}{U} \right)^2 = X \left(\frac{P}{U} \right)^2 + X \left(\frac{Q}{U} \right)^2 \quad (13)$$

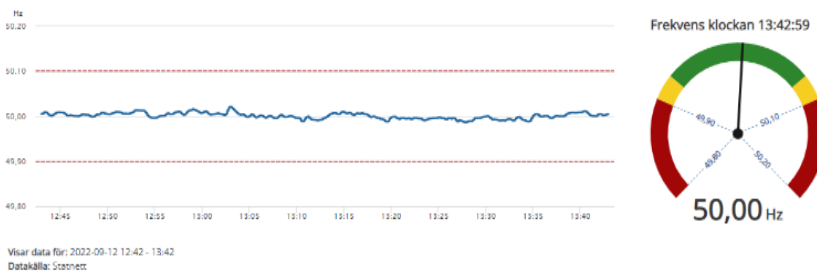
$$X = L2\pi f \quad (14)$$

Där Q_f står för reaktiva effektförluster och S är den skenbara effekten enligt ekvation 3.

Av ekvation 13 och 14 framgår att förlusterna ökar då reaktiv effekt överförs. En lösning till detta är att producera reaktiv effekt vid lasten [9]. Reaktiva effektförluster i en ledning kan generellt vara positiva eller negativa beroende på relationen mellan producerad och förbrukad reaktiv effekt i ledningen. Lednings kapacitans står för generering av reaktiv effekt och induktansen i en ledning står för förbrukning av reaktiv effekt [11].

2.10 Balans i kraftsystemet

Svenska kraftnät har uppgiften att kontrollera att det råder balans i kraftsystemet alltså att säkerställa att i varje sekund produceras lika mycket el som det efterfrågas. Till detta används en frekvens som är en indikator på hur tillförsel och förbrukning av el är i balans i systemet. I det nordiska synkronområdet är balansfrekvensen 50 Hz [12].



Figur 8: visar balans i kraftsystemet och avvikelser från 50 Hz för en timme i september 2022 [23].

2.11 Seriekompensering

Till skillnad från den aktiva effektbalansen som styr frekvensen i kraftsystemet reglerar den reaktiva balansen spänningen. För att minimera reaktiva förluster i systemet används kondensatorer som kopplas i serie med ledningen. Detta reducerar ledningens resulterande reaktans X_{res} och därmed reaktiva effektförluster. I Sverige kopplas normalt seriekondensatorer mitt i ledningen [7], [9].

$$X_{res} = X - X_c \quad (15)$$

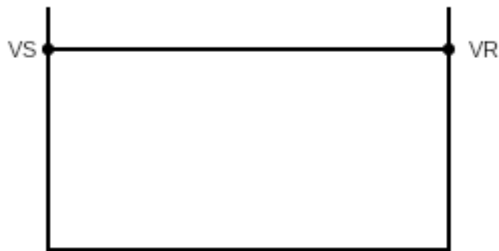
2.12 Surge impedance loading

Alla kraftledningar har en naturlig last, SIL (*surge impedance loading*) med en karakteristisk impedans Z_C [6]. Om ledningen är belastad med en last som är lika med Z_C , dvs $P_{last} = P_{SIL}$ betyder det att produktion och konsumtion av reaktiv effekt i ledningen tar ut varandra i avståndet x enligt ekvation 17.

$$SIL = \frac{V_{LL}^2}{Z_C} \quad Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (16)$$

$$\omega L I_x^2 = V_x^2 \omega C \quad (17)$$

Om förbrukning och produktion av reaktiv effekt är i balans i en ledning, är amplituden på spänningen lika stor uteslutande hela ledningen som framgår av figur 9.



Figur 9: visar att spänningens amplitud är lika stor överallt i en ledning.

SIL är ett standardmått på hur mycket en ledning kan belastas. För en ledning som är kortare än 100 km kan belastningen vara större än 3 gånger SIL förutsatt att termiska gränser inte överskrids. För medellånga

ledningarna sjunker den maximala belastningen till 1–1.5 gånger SIL innan spänningsfallet når 5 procent. Stabilitet är den faktor som för långa ledningar avgör att belastningen ska vara så nära SIL som möjligt [6].

2.13 Elbilar

På [13] och [14] kan information om antalet elbilar och nyregistrerade bilar hittas och går att ladda ner via Excelfiler. En personbil kör cirka 1100 mil per år [15]. I tabell 1 hittas antal elbilar per län i elområden SE3 och SE4. Det finns inga tydliga gränser för indelning av olika län per elområde. Vissa län exempelvis Dalarna ingår i både SE2 och SE3 men eftersom den största delen tillhör SE3, antas det att hela länet finns i SE3.

Tabell 1 visar antal registrerade elbilar för elområden SE3 och SE4 i slutet av mars 2022.

Elområde	län	Antal elbilar
SE3	Dalarna	2135
	Uppsala	4073
	Västmanland	2480
	Örebro	2466
	Stockholm	43 569
	Södermanland	2841
	Värmland	2167
	västra Götaland	22 983
	Östergötland	4963
	Gotland	652
	Jönköping	4081
SE4	Kalmar	1731
	Halland	5299
	Kronoberg	1960
	Blekinge	1250
	Skåne	18 479

Enligt Power Cirkels prognos kommer 2,5 miljoner laddbara bilar vara i trafik år 2030 [16]. Detta motsvarar ungefär hälften av alla registrerade personbilar idag. Det tyska bolaget ADAC gjorde en förbrukningstest på 29 elbilar för att jämföra olika bilar med varandra samt med WLTP-siffrorna som ges av olika biltillverkare [17]. ADACs förbrukningstest kan också jämföras med siffrorna från en annan test utförd av Mestmotor [18]. Tabell 2 visar resultat på ADACs test på topp 10 elbilar [19] i Sverige i juni 2022.

Tabell 2: förbrukning per km för topp 10 elbilar i Sverige [17], [19].

Modell	Förbrukning i ADAC:s test (Wh/km)	Förbrukning enligt tillverkare (Wh/km)	Antal registrerade i Sverige juni 2022
Audi e-tron	244	237	4493
Tesla Model S	210	150	5508
Tesla Model 3	209	160	13 708
Renault Zoe	190	177	9319
VW ID.3	193	161	7180
VW ID.4	228	177	6902
Polestar 2	292	193	5847
BMW i3	179	153	4663
Nissan Leaf	221	206	9935
Kia E-Niro	181	159	12 427

3.1 Introduktion

För att modellera, simulera och analysera transmissionsnätet i detta examensarbete har programmen MATLAB och Simulink används. Simulink är en grafisk programmeringsmiljö som är MATLAB-baserad. Mer specifikt har modellen byggts i Simscape som är en *tool box* i Simulink.

3.2 Utförande

Först studerades relevant teori och arbete för att ha tillräckligt och pålitlig kunskap för att skapa modell och göra beräkningar på parametrar och samlade data. Utförandet av detta arbete är baserat till största del på öppna data då viss information och data om det svenska kraftsystemet inte är tillgänglig för allmänheten.

3.3 MATLAB skript

Data på effekten överförd mellan olika elområden på timbasis för första kvartalet 2022 hämtades från Nord Pool [20]. Detta data fanns tillgängligt

med enheten MWh (energi) per timme för 24 timmar dagligen för SE2 till SE3 och SE3 till SE4. För de tre första månaderna av året 2022 ordnades en Excel-fil som innehöll en vektor av 2160 timmar med tillhörande överförd effekt för SE3 och SE4.

För att göra beräkningar gällande elbilar och deras effektförbrukning skapades ett MATLAB skript. Det totala antalet elbilar per SE3 och SE4 för år 2022 uppskattades genom att addera antal elbilar per län som ingick i samma elområde. Vilka län som ingår i de nämnda elområdena kan ses i tabell 1.

Laddbara bilar kommer att utgöra hälften av personbilsflottan år 2030 enligt Power Circles prognos som har nämnts tidigare i teoridelen av denna rapport.

I detta examensarbete har det antagits att alla laddbara bilar 2030 kommer att vara elbilar. Anledningen till detta var att göra beräkningarna mer generella och förenklade. Det har inte heller tagits hänsyn till de olika laddningsmöjligheterna för elbilar exempelvis att det finns olika typer av laddare (AC och DC) och att detta påverkar laddningstiden för olika bilar.

Antal elbilar per elområde för 2030 i SE3 och SE4 beräknades enligt ekvation 18.

$$\text{antal elbilar}_{2030} = \text{total antal bilar}_{2022} \cdot 0.5 \quad (18)$$

Som framgår av tabell 2 har olika bilmodeller olika energiförbrukning. Den genomsnittliga energiförbrukningen per km beräknades som medelvärdet av effektförbrukningen för de topp tio elbilarna i Sverige

under juni 2022. I beräkningen användes energiförbrukningen enligt ADAC:s test i tabell 1.

Den genomsnittliga förbrukningen för en elbil beräknades till 6.3 kWh per dag genom ekvation 19 där sträcka indikerar en ungefärlig daglig körsträcka (30 km) för en bil i Sverige år 2021 [15].

$$\text{daglig förbrukning} = (\text{sträcka} \cdot \text{förbrukning}_{km}) \quad (19)$$

Sedan räknades den dagliga förbrukningen ut som ökningen av elbilar skulle belasta transmissionsnätet med år 2030 per elområde. Resultatet fördelades slumpmässigt mellan timmarna av den valda perioden. Den timvisa effektökningen adderades till effektvärden för varje timme av första kvartalet av 2022 som bestod av ca 2160 timmar. Det erhållna resultatet användes sedan för simuleringar och analyser på förluster i modellen för transmissionsnätet.

ledningsparametrarna resistansen R , induktansen L och kapacitansen C för modellen beräknades i MATLAB baserad på relevanta ekvationer och data i teoridelen av denna rapport. MATLAB koden i Appendix B visar hur dessa värden har beräknats. Värdena som beräknades för att användas i modellen är:

- $R = 10.26 \text{ m}\Omega/\text{km}$
- $L = 0.83 \text{ mH}/\text{km}$
- $C = 13.64 \text{ nF}/\text{km}$

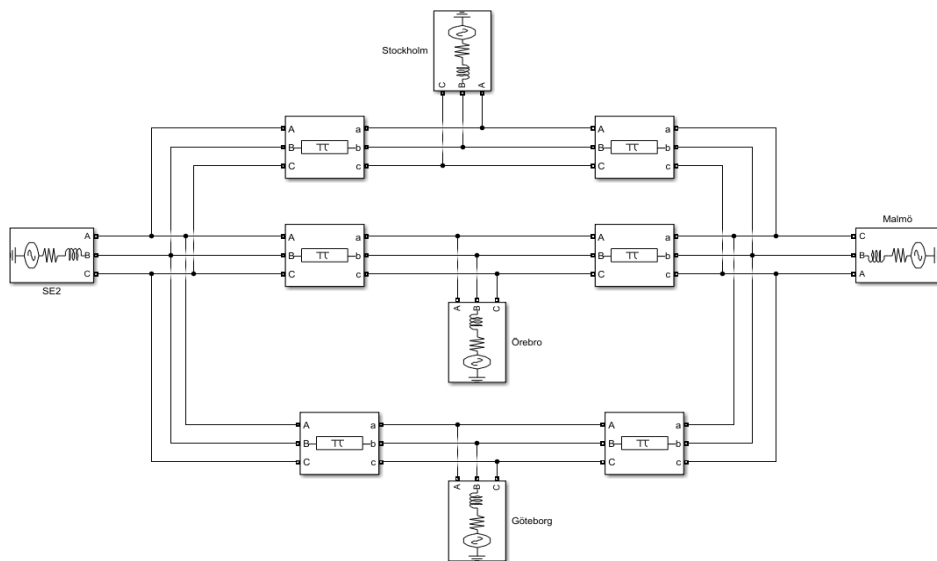
3.4 Modellering av transmissionsnätet

Först användes en online karta [21] för att uppskatta längden på 400 kV kraftledningar i de avsedda elområde. 220 kV ledningar har försumrats i modelleringen i projektet. I modellen har SE3 delats i tre noder eller stationer: Stockholm, Örebro och Göteborg och SE4 innehåller en station: Malmö. Detta betyder att ledningar härstammar från en nod i SE2 och fördelas mellan tre noder i SE3 och sedan går till en nod i SE4.

3.5 Simscape modellering

Modellen för transmissionsnätet konstruerades i Simscape där biblioteket: *Specialized Power Systems* utnyttjades för detta ändamål. Simscape ger möjlighet att skapa, testa och optimera fysiska system.

I Simscape skapades först en så kallad blank modell. Sedan användes Simscares komponenter för att representera de olika noderna och för att ansluta de till varandra genom ledningar. Figur 10 visar grunden för modellen.



Figur 10: en översiktligt bild av modellen för transmissionsnätet i SE3 och SE4 skapad i Simscape.

Den verkliga modellen skiljer sig lite från den i figur 10 men basen är samma. För den verkliga modellen används fler komponenter och ledningar.

Modellen innehåller 5 noder varav en är *slack bus* (nod) i SE2 där både spänning och vinkeln är känd. De andra noderna är *PQ* noder som representerar laster med känd effektförbrukning.

Blocken med symbolen π kallas för *PI Section* och används för att föra in värden på ledningarnas parametrar för medellånga ledningar. Visa ledningar i Sveriges transmissionsnät har en längd större än 300 km. I modellen i detta arbete har två *PI Section* block seriekopplats för sådana ledningar. Anledningen till detta var att först modellerades långa ledningar med andra block så kallad *Distributed Parameters Line* som används för ledningar vars längd är större än 300 km. Sådana block krävde noggranna indata och gav komplikationer vid modellering och simuleringar. Därför användes seriekoppling av två *PI Section* för långa ledningar i detta arbete. Detta har tagits upp i avsnitt 2.7 i teoridelen.

Modellen innehåller också seriekondensatorer för att minimera induktansen i ledningar och därmed reaktiva effektförluster som följd. Den verkliga överförda effekten mellan elområden per timme har fördelats mellan olika noder i modellen beroende på antal ledningar. Lasten i SE4 förbrukar den effekt som överförs mellan SE3 och SE4.

För modellen antas det att noder i SE3 och SE4 förbrukar bara aktiv effekt och ingen reaktiv effekt. Alla noder antas att ha en spänningsamplitud på 400 kV. För att uppskatta förluster i ledningarna gjordes så kallad *Load Flow Analysis* i *Simscae*. En sådan analys genererar en rapport över spänningar, aktiva och reaktiva effekter osv för en modell för ett specifikt stabilt tillstånd.

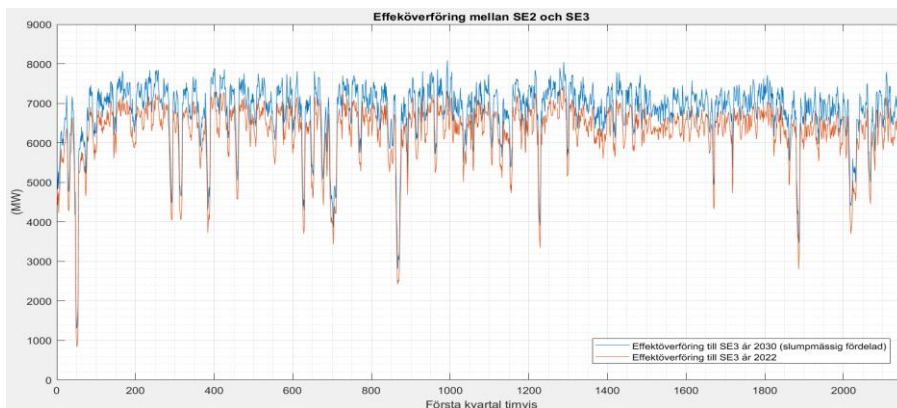
För att göra analyser på effektförluster i transmissionsnätet valdes 8 timmar av första kvartalet för 2022 och 2030 (samma timmar) från det samlade data från Nord Pool. Bland dessa timmar hittas timmar med de högsta effektuttagen. För varje timme sparades en rapport från *Load Flow Analysis*. Förlusterna importerades sedan från varje rapport till en Excel-fil för att organisera och göra plottar och tabeller.

Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten av analyser och simuleringar i form av plottar, tabeller och diagram. I Appendix A hittas vissa resultat i en annan form.

4.1 Simuleringar för elbilar

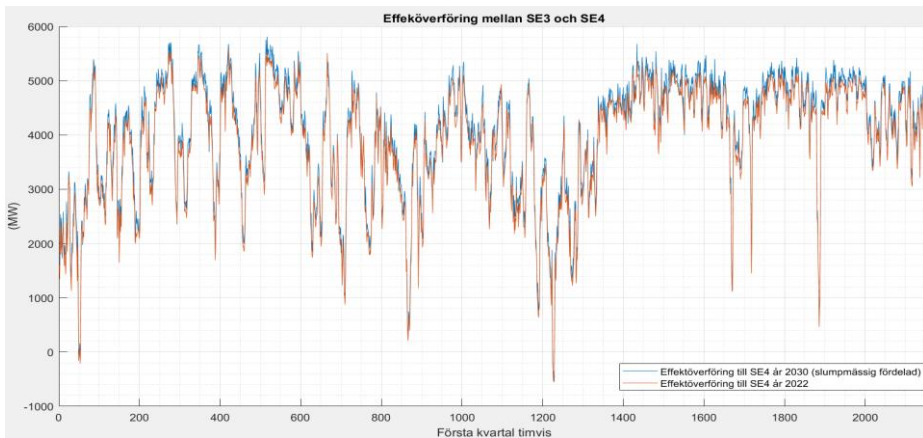
Figur 11 illustrerar ökningen i effekten (MW) som behöver transmittas från SE2 till SE3 orsakade av elbilar år 2030. Resultatet visar att för vissa



Figur 11: visar effektöverföring från SE2 till SE3 för första kvartalet av år 2022 i jämförelse med år 2030 där ökningen i effektförbrukningen är slumpmässigt fördelad.

timmar når effektuttaget 8000 MW. För år 2030 har effektförbrukningen för elbilar per timme slumpmässigt fördelats.

För effektöverföringen mellan SE3 och SE4 blir ökningen lite mindre som framgår av figur 12. Den högsta effektöverföringen ligger mellan 5800–6000 MW.



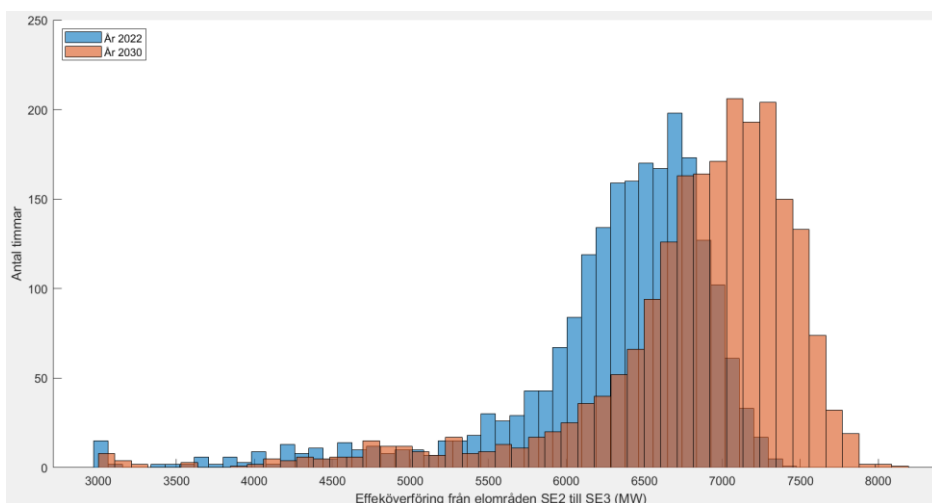
Figur 12: visar effektöverföring från SE3 till SE4 för första kvartalet av år 2022 i jämförelse med år 2030 där ökningen i effektförbrukningen är slumpmässigt fördelad.

Tabell 3 visar värden på några parametrar som har använts eller uppskattas i projektet. I tabellen avser effektförbrukningen per dag den effekt som elbilar totalt använder under en dag för respektive elområde.

Tabell 3: resultat på beräkningar från MATLAB skriptet relaterade till elbilar.

Elområde	Antal elbilar år 2022	Antal elbilar år 2030	Energiförbrukning per dag 2022 (MWh)	Energiförbrukning per dag 2030 (MWh)
SE3	92 338	1 571 963	585	9972
SE4	28 719	587 137	182	3725

Histogrammet i figur 13 förtydligar hur effektöverföringen fördelar sig mellan olika timmar av första kvartalet för år 2022 och 2030. Det syns i figuren att år 2030 överförs högre effekt för fler timmar jämfört med 2022. Exempelvis är antalet timmar som har en effektöverföring på ca 7300 MW över 200 för 2030. Däremot har kvartalet för år 2022 mindre än 50 timmar med samma effektöverföring per timme.



Figur 13: visar belastningen på ledningar mellan SE2 och SE3 år 2022 jämfört med 2030.

4.2 Simscape resultat

I detta avsnitt presenteras resultaten från Simscapes simuleringar och analyser. Resultaten avser effektöverföringar och förluster för respektive elområde dels för år 2022 dels för år 2030. Effektöverföringar för år 2030 har räknats genom att addera den elförbrukning som elbilar orsakar till effektvärdena för år 2022. Överföringar mellan SE2 och SE3 inkluderar effektöverföringen mellan SE3 och SE4. Effektflödet är alltså från SE2 till SE3 och därifrån vidare till SE4.

Tabell 4: resultat från Load Flow Analysis för 8 valda timmar i första kvartalet av år 2022 och 2030. Det framgår av tabellen hur aktiva effektförluster ökar för 2030 enligt simuleringar jämfört med effektdata för år 2022 (kolumn 1 och 3).

SE2=>SE3	SE2=>SE3	SE3=>SE4	SE3=>SE4	Förluster	Förluster
2022	2030	2022	2030	2022	2030
MW	MW	MW	MW	%	%
4229	4644	1798	2043	1,94	2,15
5530	5997	1615	1833	2,28	2,50
6280	6729	2561	2724	2,88	3,10
4778	5328	2066	2160	2,20	2,40
6783	7291	4840	5083	4,30	4,66
7161	7669	4798	5041	4,65	4,71
3573	4028	969	993	0,98	1,14
7448	8194	3972	4081	3,84	3,95

Tabell 5 belyser reaktiva effektförluster enligt modellen i projektet. De negativa värdena indikerar på överskott av reaktiv effekt. Värdena är baserade på seriekompenseringar i ledningar dvs att ledningars reaktanser har minskats.

Tabell 5: visar det totala reaktiva effektförluster för 8 timmar under första kvartalet för år 2022 och 2030 enligt simuleringar.

Reaktiv effekt 2022 Mvar	Reaktiv effekt 2030 Mvar
-1945	-1467
-806	-179
598	1357
-1334	-742
3614	4703
4098	5230
-2731	-2399
3296	4286

5

Diskussion

I denna del av rapporten diskuteras resultatet och metoden som har använts för att genomföra projektet. Det finns också ett avsnitt som handlar om förbättringar som kan göra att resultaten och modellen mer realistiska.

5.1 Resultat

Resultaten i detta projekt är mestadels baserade på öppna data och prognoser. I beräkningarna angående elbilar eller ledningsparametrar har många faktorer förenklats eller försumrats. Till exempel har det antagits att alla ledare är av samma typ och har lika stora diametrar. Resistansen för ledarna har beräknats för likström även om det inte skiljer sig mycket från växelströmsfallet. Även koronaförluster som ingår i ohmiga (aktiva) effektförluster har försumrats i projektet.

Resultaten visar att för vissa timmar är effektöverföringen större än 8000 MW per timme vilket är cirka 700 MW över maximalt NTC för SE2=>SE3 [22]. Detta kan betyda att ledningarnas kapacitet mellan dessa elområden inte räcker för det förut beräknade effektöverföringarna för 2030 i detta arbete.

För SE3=>SE4 nås inte maximalt NTC (6200 MW) värdet för timmarna i första kvartalet 2030. Detta kan tolkas som att transmissionsnätet i detta fall har kapaciteten för effektöverföringar från SE3 till SE4 när antalet elbilar ökar i SE4 i framtiden.

För modelleringen av transmissionsnätet i elområden SE3 och SE4 har det gjorts grova förenklingar, exempelvis har bidraget av 220 kV ledningar för att överföra effekt förbisetts.

Aktiva effektförluster ökar som framgår av resultaten när effektöverföringen blir större mellan elområden. Dock kan förlustvärdena inte verifieras eftersom arbetet grundar sig på öppna data och att det inte gick att få tag på relevanta data för att jämföra. Förlusterna varierar mellan cirka 1–4,7 % för de valda timmarna för analys. Första kvartalet av året valdes för simuleringar eftersom effektöverföringarna i denna period är relativt stora i jämförelse med exempelvis en sommarmånad.

Reaktiva effektförluster är både negativa och positiva enligt beräkningarna för de 8 valda timmarna. Att de är negativa betyder att i modellen produceras mer reaktiv effekt än vad som förbrukas. Detta beror framför allt på att i modellen har seriekompensering använts. Kompenseringen gjordes för att hålla spänningvärdena i alla stationer nära 400 kV. Att de är negativa eller positiva kan tolkas som att den totala effektöverföringen ligger under eller över SIL värdet.

5.2 Metod

För att samla pålitligt data och information gällande transmissionsnätet kontaktades inledningsvis svenska kraftnät men vi fick ingen respons. Därför gjordes generella beräkningar för att uppskatta det data som behövdes baserad på andra källor. Metoden skulle möjligen vara mer tillförlitlig med aktivt stöd ifrån svenska kraftnät. En brist som metoden

visade sig ha varit att beräkna effektförlusterna för en lång period på ett effektivt sätt. Först skulle effektförlusterna beräknas för alla timmar i ett kvartal, men det skulle ta en ganska lång tid att utföra detta med *Load Flow Analysis* i Simscape. Det finns många program som kan utnyttjas för analys av ett kraftsystem. Det skulle vara intressant att använda andra program än MATLAB för modelleringen i detta examensarbete. För att använda dessa program krävs dock licens som användaren behöver ha tillgång till eller köpa.

5.3 Eventuella förbättringar i framtiden

Modellen är en bra grund som kan förbättras genom att addera påverkan av andra viktiga faktorer till den. Exempelvis kan modellen kompletteras med HVDC länken i södra Sverige och 220 kV ledningarna som har försumrats i detta projekt. Vidare kan modellen kompletteras med andra komponenter för att simulera spänningsfall och stabilitet i systemet som är betydelsefull för långa ledningar.

6

Slutsats

Resultaten visar uppskattningsvis hur belastningen på transmissionsnätet i SE3 och SE4 förändras vid ökande antal elbilar år 2030 om hälften av personbilarna är elbilar.

En slutsats som kan dras från resultatet i detta examensarbete är att baserad på den skapade modellen, kommer förlusterna i transmissionsnätet öka. Anledningen är att på grund av ökad andel elbilar, behöver större effekt transmittas från norra Sverige där det finns mer produktion till södra landet där det är brist på elproduktion.

En annan slutsats är att flaskhalsar enligt detta examensarbete kommer begränsa effektöverföringen mellan SE2 och SE3 år 2030 då elbilar utgör hälften av personbilsflottan. Därför behöver kapaciteten för effektöverföring mellan SE2 och SE3 öka alternativt måste en del av effekten produceras lokalt i SE3.

Referenser

- [1] ”Sveriges klimatpolitisk handlingsplan”. Åtkomstdatum: 05 maj 2022. [Online]. Tillgänglig vid: <https://data.riksdagen.se/fil/4BACED10-D33B-4C83-98E6-530BFCE03492>
- [2] ”Stark tillväxt av elbilar under årets första kvartal”. <https://press.powercircle.org/posts/pressreleases/press.powercircle.org/posts/pressreleases/stark-tillvaxt-av-elbilar-under-arets-forsta> (åtkomstdatum 05 maj 2022).
- [3] ”Sveriges elnät”. <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/oversikt-av-kraftsystemet/sveriges-elnat/> (åtkomstdatum 12 september 2022).
- [4] ”Elområden”. <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-elmarknaden/elomraden/> (åtkomstdatum 12 september 2022).
- [5] ”Teknik”. <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-transmissionsnätet/teknik/#Luftled.Billig> (åtkomstdatum 24 april 2022).
- [6] N. Mohan, *Electric Power Systems, A First Course*.
- [7] K. A. Jacobsson, S. Lidström, och C. Öhlén, *Elkraftsystem 2*, 4:e uppl.
- [8] D. Glover, T. Overbye, och M. Sarma, *Power System Analysis and Design*, 6:e uppl.

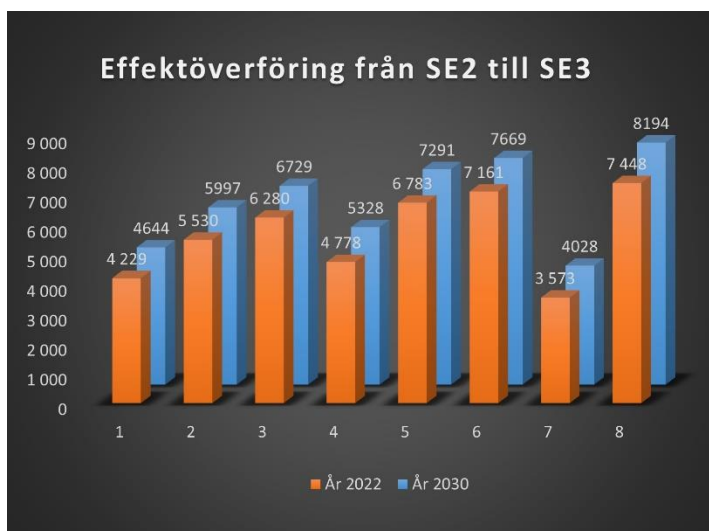
- [9] K. A. Jacobsson, S. Lidström, och C. Öhlén, *Elkraftsystem 1*, 3:e uppl.
- [10] P. Kundur, *Power system stability and control*.
- [11] J. Machowski, J. W. Bialek, och J. R. Bumby, *Power System dynamics*, 2:a uppl.
- [12] ”Balansering av kraftsystemet”. <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-systemansvaret/balansering-av-kraftsystemet/> (åtkomstdatum 12 september 2022).
- [13] ”Fordon på väg”. <https://www.trafa.se/vagtrafik/fordon/> (åtkomstdatum 10 november 2022).
- [14] ”Nyregistreringar”, *BilSweden*.
<https://mobilitysweden.se/statistik/databas-nyregistreringar>
(åtkomstdatum 10 november 2022).
- [15] ”korstrackor-2021.pdf”. Åtkomstdatum: 10 november 2022.
[Online]. Tillgänglig vid:
<https://www.trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/korstrackor/2021/korstrackor-2021.pdf>
- [16] ”Milstolpen 300 000 laddbara fordon passerades vid årsskiftet”.
<https://press.powercircle.org/posts/pressreleases/press.powercircle.org/posts/pressreleases/milstolpen-300-000-laddbara-fordon-passerades> (åtkomstdatum 12 september 2022).
- [17] Kristofer, ”29 elbilar i räckvidds- och förbrukningstest – Hyundai Ioniq och Tesla Model X i topp”, *Allt om Elbil*, 24 maj 2021.
<https://alltomelbil.se/29-elbilar-i-rackvidds-och-forbrukningstest-hyundai-ioniq-och-tesla-model-x-i-topp/> (åtkomstdatum 09 november 2022).
- [18] C. Macklin, *Svenska körvanors påverkan på elnätet vid en elektrifiering av Sveriges fordonsflotta*. 2020. Åtkomstdatum: 10

november 2022. [Online]. Tillgänglig vid:
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-172141>

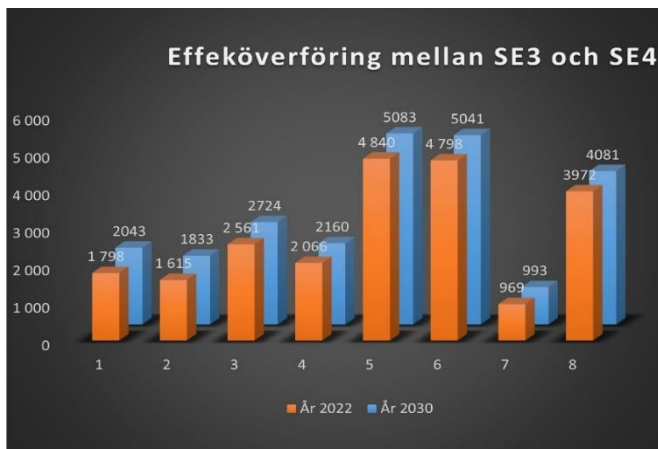
- [19]”Elbilsstatistik”, *elbilsstatistik*.
<https://www.elbilsstatistik.se/elbilsstatistik> (åtkomstdatum 09 november 2022).
- [20]”View hourly exchange.”
<https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Power-system-data/Exchange1/SE/Hourly2/> (åtkomstdatum 11 november 2022).
- [21]”Interaktiv karta”, *hitta.se*. <https://www.hitta.se/kartan>
(åtkomstdatum 11 november 2022).
- [22]”max-ntc.pdf”. Åtkomstdatum: 17 november 2022. [Online].
Tillgänglig vid:
<https://www.nordpoolgroup.com/4aac67/globalassets/download-center/tso/max-ntc.pdf>
- [23]”Transmissionsnätskarta”. <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/om-transmissionsnatet/transmissionsnatskarta/> (åtkomstdatum 12 september 2022).
- [24]”Kontrollrummet”. <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/kontrollrummet/> (åtkomstdatum 12 september 2022).

8

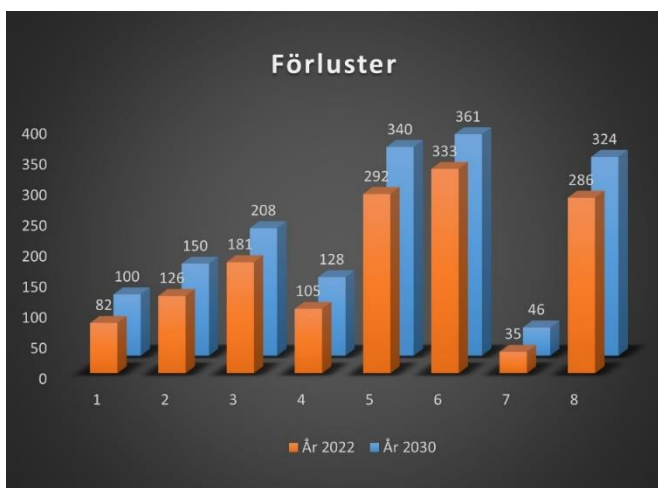
Appendix A



Figur 14: visar effektöverföring (MW) mellan elområden SE2 och SE3 för 8 olika timmar.



Figur 15: visar effeköverföring (MW) mellan elområden SE3 och SE4 för 8 olika timmar.



Figur 16: visar transmissionsnätets förluster (MW) i SE3 och SE4 för 8 valda timmar i första kvartal av året.

9

Appendix B

```
%beräkning av ledningsparametra: R, L och C
R = 28/(3*910);    % Ω/km, resistans per fas

%distans mellan faserna i en trefasledning (m)
D = 9;
Distans mellan linor i en fas för triplex
arrangemang (m)
d = 0.6
% GMR för en ledare (m)
Ds = 0.01585;
% GMR för triplex arrangemang (m)
Dsl = (Ds * d^2)^(1/3);
% GMD för triplex arrangemang (m)
Deq = (D * 2*D * D)^(1/3);
% induktans per km (H)
Lkm = 2e-7 * log( Deq / Dsl) * 1000;

% linans yttre radie (m)
rc = 0.01962;
Dsc = (rc * d^2)^(1/3);    % (m)
%dielektricitetnskonstant
epsilon = 8.854e-12;
% kapacitans per km (F)
Ckm = (2 * pi * epsilon) / (log( Deq / Dsc)) *
1000;
```