



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Elektromobilių baterijų (V2G) taikymo sisteminių paslaugų rinkoje analizė**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Motiejus Vaitkaitis**

Projekto autorius

**Doc. Mindaugas Ažubalis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Elektromobilių baterijų (V2G) taikymo sisteminių paslaugų rinkoje analizė**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Motiejus Vaitkaitis**

Projekto autorius

**Doc. Mindaugas Ažubalis**

Vadovas

**Doc. Roma Račkienė**

Recenzentė

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Motiejus Vaitkaitis

## **Elektromobilių baterijų (V2G) taikymo sisteminių paslaugų rinkoje analizė**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Motiejus Vaitkaitis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Vaitkaitis, Motiejus. Elektromobilių baterijų (V2G) taikymo sisteminių paslaugų rinkoje analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: V2G, tinklo balansavimas, elektromobiliai

Kaunas, 2026. 46 p.

### **Santrauka**

V2G (angl. *Vehicle-to-Grid*) technologija leidžia elektromobiliams ne tik naudoti elektros tinklą kaip energijos šaltinį, bet ir grąžinti sukauptą energiją atgal į tinklą, taip tampant aktyviais tinklo balansavimo dalyviais. Šiame darbe analizuojamas V2G technologijos potencialas sisteminių paslaugų rinkoje, gilinantis į techninius veikimo principus, galimą poveikį elektromobilių baterijoms bei diegimo iššūkius.

Tyrimo metu *MATLAB Simulink* aplinkoje sukurtas ir pritaikytas simuliacijos modelis, atspindintis Lietuvos elektros tinklo parametrus. Remiantis modeliu atliktos simuliacijos su skirtingu V2G tipo elektromobilių kiekiu, stebint tinklo dažnio pokyčius ir baterijų elgseną esant kintančioms apkrovoms.

Simuliacijų rezultatai parodė, kad didinant elektromobilių kiekį tinkle gerėja tinklo dažnio stabilumas ir mažėja nuokrypiai nuo nominalios reikšmės. Nustatyta, kad elektromobilių baterijos aktyviai reaguoja į apkrovos pokyčius, tiekdamos energiją į tinklą arba ją vartodamos priklausomai nuo situacijos. Tyrimas patvirtina, kad V2G technologija gali veiksmingai dalyvauti dažnio reguliavimo paslaugose ir prisidėti prie elektros tinklo stabilumo užtikrinimo.

Vaitkaitis, Motiejus. Analysis of Application of Electric V2G Vehicle Batteries in System Services Market. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Mindaugas Ažubalis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electrical engineering, engineering sciences.

Keywords: V2G, grid balancing, electric-vehicles

Kaunas, 2026. 46.

### **Summary**

Vehicle-to-Grid (V2G) technology enables electric vehicles to not only draw energy from the power grid but also return stored energy back to it, making them active participants in grid balancing. This thesis analyzes the potential of V2G technology in the system services market, examining its technical operating principles, potential impact on electric vehicle batteries, and deployment challenges.

A simulation model adapted to Lithuanian grid parameters was developed in the *MATLAB* Simulink environment. Using this model, simulations were conducted with varying numbers of V2G-capable electric vehicles, observing grid frequency behavior and battery response under changing load conditions.

The simulation results demonstrated that increasing the number of electric vehicles connected to the grid improves frequency stability and reduces deviations from nominal value. The vehicle batteries were found to actively respond to load changes, either supplying energy to the grid or absorbing it depending on the situation. The study confirms that V2G technology can effectively participate in frequency regulation services and contribute to maintaining overall power grid stability.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>11</b>
1.1. Techniniai veikimo principai ir infrastruktūra .....	11
1.1.1. V2G veikimo principai .....	11
1.1.2. DC krovimo stotelės .....	12
1.1.3. V2G suderinami elektromobiliai ir baterijų technologijos .....	13
1.1.4. Komunikacijos protokolai ir valdymo sistemos .....	13
1.2. V2G vaidmuo sisteminių paslaugų rinkoje .....	14
1.2.1. Sisteminių paslaugų apibrėžimas ir reikšmė .....	14
1.2.2. V2G teikiamos sisteminės paslaugos .....	15
1.2.3. Generatorių reikalavimai .....	17
1.3. Poveikis elektromobilių baterijoms .....	18
1.3.1. Baterijų degradacijos didinimo vengimas .....	18
1.3.2. Degradaciją įtakojantys veiksniai .....	18
1.4. Degradacijos mažinimo strategijos ir teigiamas poveikis .....	19
1.5. Iššūkiai ir sprendimai .....	20
1.5.1. Technologiniai iššūkiai.....	20
1.5.2. Socialiniai ir vartotojų priėmimo iššūkiai .....	20
<b>2. Metodologinė dalis.....</b>	<b>21</b>
2.1. Modeliavimo technikos .....	22
2.2. Modeliavimo programinė įranga .....	23
2.3. Elektromobilių baterijos talpa .....	23
2.4. Matematinis modelis ir jo analizė.....	24
<b>3. Tiriamoji dalis.....</b>	<b>30</b>
3.1. Simuliacija su 13 MW pastovia apkrova ir 1 V2G elektromobiliu: .....	30
3.2. Simuliacija su 13 MW pastovia apkrova ir 5 V2G elektromobiliu: .....	30
3.3. Simuliacija su 13 MW pastovia apkrova ir 10 V2G elektromobiliu: .....	33
3.4. Simuliacija su 13 MW pastovia apkrova ir 20 V2G elektromobiliu: .....	36
3.5. Simuliuotų duomenų palyginimas .....	38
3.5.1. Santykinio tinklo dažnio palyginimas .....	38
3.5.2. Sistemos stabilizavimosi laikas .....	40
3.5.3. Baterijų įkrovos lygis .....	40
3.5.4. Elektromobilių galia .....	41
<b>Išvados .....</b>	<b>43</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>44</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Minimalus FCR veiklos laikotarpis [20] .....	15
<b>2 lentelė.</b> Pasirinktų elektromobilių su V2G vidutinė baterijos talpa .....	24
<b>3 lentelė.</b> Tinklo santykinis dažnis priklausomai nuo elektromobilių kiekio.....	38
<b>4 lentelė.</b> Tinklo stabilizavimosi laikas priklausomai nuo elektromobilių kiekio sekundėmis.....	40
<b>5 lentelė.</b> Baterijos įkrovos lygis priklausomai nuo apkrovų būsenos .....	40
<b>6 lentelė.</b> Elektromobilių galia .....	41

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b>	Supaprastinta V2G schema [1].....	11
<b>2 pav.</b>	Sigenergy SigenStor DC bidirekcinė įkrovimo stotelė [7].....	12
<b>3 pav.</b>	Priekinės komunikacijos protokolų sąrašas [12].....	14
<b>4 pav.</b>	Dažnio atstatymo sistemų veikimo laikai[21].....	16
<b>5 pav.</b>	Piko apkrovos „apkarpymas“ kai krovimas vyko iš saulės elektrinių[3].....	16
<b>6 pav.</b>	Baterijų senėjimas [29].....	18
<b>7 pav.</b>	Baterijos talpos priklausymas nuo ciklų[31].....	19
<b>8 pav.</b>	Supaprastinta tinklo schema.....	21
<b>9 pav.</b>	Tiriamas tinklo modelis „Microgrid with Electric Vehicles V2G (Vehicle-to-Grid) Support“ .....	25
<b>10 pav.</b>	Sinchroninio generatoriaus modelio dalis.....	26
<b>11 pav.</b>	Tinkle prijungta pastovi apkrova su viena prijungiama ir kita išjungiama apkrova.....	26
<b>12 pav.</b>	Įtampos ir srovės matavimo blokas bei galios jutiklio blokas.....	27
<b>13 pav.</b>	Transformatoriaus blokas simuliacijos modelyje.....	28
<b>14 pav.</b>	Kintamos / nuolatinės srovės keitiklio blokas naudojantis vidutinės vertės metodą.....	29
<b>15 pav.</b>	Baterijos, kondensatoriaus ir įtampos ir srovės matavimo blokas.....	29
<b>16 pav.</b>	Santykinis tinklo dažnis „be elektromobilių“.....	30
<b>17 pav.</b>	Santykinis tinklo dažnio grafikas su 5 V2G EA.....	31
<b>18 pav.</b>	V2G baterijos galia su 5 V2G EA.....	31
<b>19 pav.</b>	V2G baterijos įtampa su 5 V2G EA.....	32
<b>20 pav.</b>	V2G baterijos srovė su 5 V2G EA.....	32
<b>21 pav.</b>	V2G baterijos įkrovos lygis su 13 MW apkrova ir 5 V2G EA.....	33
<b>22 pav.</b>	Santykinis tinklo dažnio grafikas su 10 V2G EA.....	33
<b>23 pav.</b>	V2G baterijos galia su 10 V2G EA.....	34
<b>24 pav.</b>	V2G baterijos įtampa su 10 V2G EA.....	34
<b>25 pav.</b>	V2G baterijos srovė su 10 V2G EA.....	35
<b>26 pav.</b>	V2G baterijos įkrovos lygis su 13 MW apkrova ir 10 V2G EA.....	35
<b>27 pav.</b>	Santykinis tinklo dažnio grafikas su 20 V2G EA.....	36
<b>28 pav.</b>	V2G baterijos galia su 20 V2G EA.....	36
<b>29 pav.</b>	V2G baterijos įtampa su 20 V2G EA.....	37
<b>30 pav.</b>	V2G baterijos srovė su 20 V2G EA.....	37
<b>31 pav.</b>	V2G baterijos įkrovos lygis su 13 MW apkrova ir 20 V2G EA.....	38
<b>32 pav.</b>	Santykinio tinklo dažnio palyginimas su skirtingais V2G elektromobilių kiekiais.....	39
<b>33 pav.</b>	Tinklo stabilizavimosi laikas priklausomai nuo elektromobilių.....	40
<b>34 pav.</b>	V2G įkrovos lygis priklausomai nuo apkrovos būsenos.....	41
<b>35 pav.</b>	Elektromobilių atidavimo ir krovimo galia.....	42

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

EA – elektromobilai;

V2G – „Vehicle-to-Grid“;

G2V – „Grid-to-Vehicle“;

SoC – baterijos įkrovos lygis (angl. *State of Charge*);

DC – nuolatinė srovė;

AC – kintama srovė;

CVS – centrinė valdymo sistema;

IEEE – Elektros ir elektronikos inžinierių institutas (angl. „*Institute of Electrical and Electronics Engineers*“).

## Įvadas

Elektromobilių (EA) plėtra keičia ne tik transporto sektorių, bet ir energetikos sistemą. Žmonės įprastai yra įpratę, kad elektromobiliai yra elektros energijos vartotojas. Tačiau, atsiradus „Vehicle-to-Grid“ (V2G) bei dvipusio elektros perdavimo technologijoms elektromobiliuose, jie tapo ne tik vartotojas, bet ir gamintojais. V2G technologija leidžia elektromobiliui savo turimą bateriją naudoti ne tik krauti, bet kai yra reikalus ir sukauptą energiją atiduoti atgal į tinklą [1]. Tokio tipo elektros perdavimas paverčia elektromobilius mobilias energijos tinklo dalimi kurie gali tiekti energiją ir būti sisteminės paslaugų rinkos dalimi [1].

Nors dvipusis įkrovimas (angl. *bi-directional charging*) dažnai vartojamas sinonimiškai su V2G, yra skirtumas tarp šių apibrėžimų, dvipusis įkrovimas reiškia dvipusį energijos srautą (įkrovimą ir iškrovimą), kuris gali vykti tarp mašinos ir prijungtos sistemos, o V2G technologija konkrečiai apima energijos srautą iš automobilio baterijos atgal į elektros tinklą [1]. V2G įkrovimo / iškrovimo sistemą sukuria dar vieną galimybę balansuoti tinklo sistemą, įkrovimo galią, didinant ar mažinant ją pagal poreikį, esant tinklo perkrovai. V2G leidžia įkraunamą energiją laikinai grąžinti į tinklą, siekiant subalansuoti energijos gamybos ir vartojimo svyravimus [1]. Platesnis terminas, apimantis V2G, yra V2X (angl. *Vehicle-to-Everything*), kuris apima ir energijos perdavimą į namus (V2H – „vehicle to home“), pastatus (V2B – „vehicle to building“) ar kitus įrenginius (V2L – „vehicle to load“) [2].

**Darbo tikslas** – išanalizuoti matematinį modelį bei atlikti simuliaciją kuris parodytų kaip V2G elektromobilio baterijos gali įtakoti tinklą.

### Darbo uždaviniai:

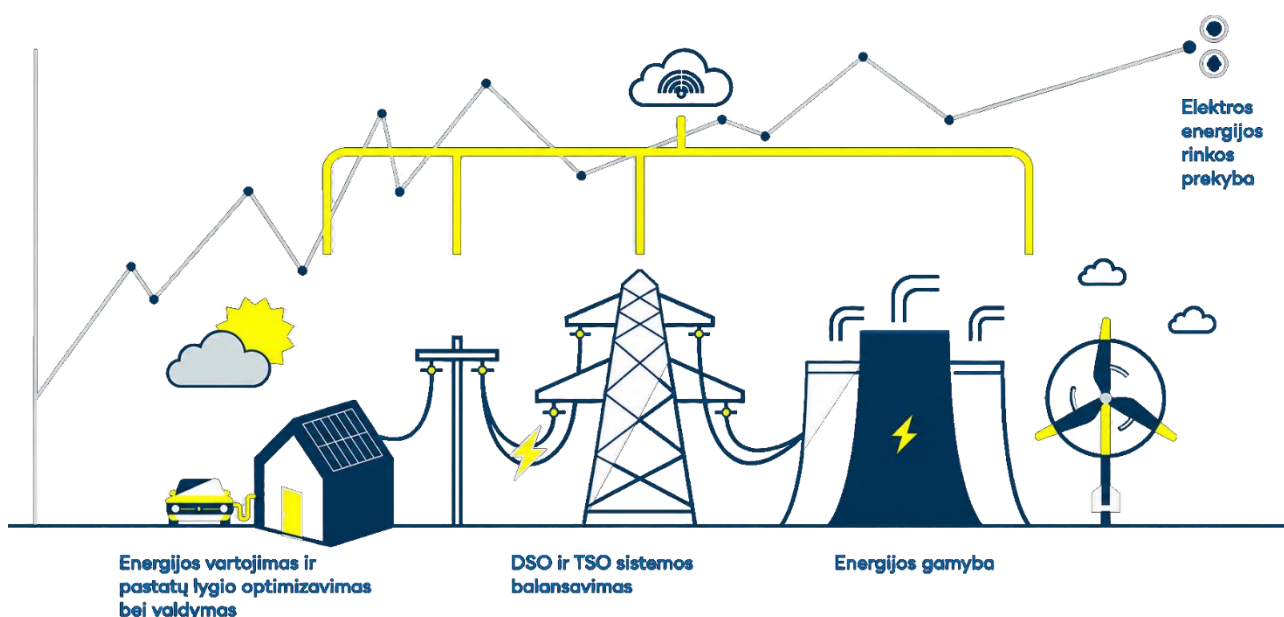
1. atlikti literatūros analizę apie V2G panaudojimą sisteminėse tinklo paslaugose;
2. ištirti pasirinktą *Matlab* simuliacijos modelį ir pritaikyti jo parametrus norimai sistemai;
3. atlikti simuliacija su skirtingais elektromobilių kiekiais ir surinkti duomenis apie tinklą bei elektromobilius;
4. atlikti duomenų analizę ir aprašyti įtaką tinklui.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Techniniai veikimo principai ir infrastruktūra

#### 1.1.1. V2G veikimo principai

V2G technologija veikia kaip dvipusė energijos mainų sistema tarp elektromobilio ir elektros tinklo. Pagrindinė idėja yra leisti elektromobilio baterijai būti iškraunamai remiantis skirtingais duomenimis kurie ateina iš tinklo, pavyzdžiui, energijos gamyba ar vartojimu netoliese [1]. Kai elektromobilis yra prijungtas prie V2G įkrovimo stotelės, jis gali ne tik imti elektros energiją iš tinklo baterijai įkrauti, bet ir grąžinti joje sukauptą energiją atgal į tinklą, kur ji panaudojama padengti tinklo trūkumą [1]. Tai leidžia elektromobiliams veikti kaip buferiams, kaupiantiems energijos perteklių ir tiekiantiems jį tinklui didelės apkrovos laikotarpiais [3].



1 pav. Supaprastinta V2G schema [1]

Kai V2G sistema yra taikoma praktikoje, ji turi užtikrinti, kad EA vairuotojai turėtų pakankamai sukauptos energijos savo automobilių baterijose, kai jos jiems reikia. V2G sistema reikalauja, kad vairuotojas galėtų nurodyti, kada nori atjungti automobilį, kad galėtų savo automobilį išnaudoti savo planuotiems poreikiams, tai yra turi būti išlaikytas pakankamas įkrovos lygis eiliniam elektromobilio naudojimui [1]. Išmaniosios V2G sistemos, pavyzdžiui, „Virta“ sprendimas, užtikrina, kad automobilio baterija visada būtų įkrauta iki 70–90%, kai vairuotojui reikia išvykti [1].

V2G sistemose naudojami dvipusiai keitikliai, kurie yra viena iš pagrindinių elektromobilių dalių susietų su baterijomis, kadangi šios naudoja DC srovę. Šie keitikliai konvertuoja nuolatinę srovę (DC) iš elektromobilio baterijos į kintamąją srovę (AC), kuri yra naudojama tinkle. Šie keitikliai kontroliuoja dvipusį elektros srautą [4]. Srovės keitimo vieta priklauso nuo įkrovimo tipo: DC įkrovimo atveju keitiklis yra įkrovimo stotelėje, stotelės turi turėti galimybę palaikyti V2G funkciją, o AC įkrovimo atveju – elektromobilyje [2]. DC įkrovikliai, atliekantys konversiją iš AC į DC yra lengviau panaudojami V2G rinkoje, taip yra todėl, nes AC įkrovimui konvertavimą turi atlikti pats

automobilis. Tačiau atbuliniam atidavimui turi būti įdiegtas specialus įkroviklis, kuris palaiko dvipusį srautą, o daugelis EA neturi tokio įkroviklio [2].

### 1.1.2. DC krovimo stotelės

Kadangi daugelis elektromobilių savyje neturi galimybės konvertuoti nuolatinės srovės į kintamą, jų integraciją naudoti V2G yra tiesiogiai nenaudinga. O tie elektromobiliai kurie turi galimybę krauti ir atiduoti naudojant DC tipo kroviklius nėra apriboti vidiniais elektromobilių apribojimais dėl konvertavimo iš DC į AC, kadangi DC krovimo stotelės yra atsakingos už šį konvertavimą tai leidžia daugiau elektromobilių prisidėti prie V2G, jeigu jie turi įgalinimą atiduoti atgalinę DC srovę, kuris gali būti atliekamas pagal *IEC 61851* standartą.

DC krovimo stotelės įprastai gali atiduoti didesnę galią atgal į tinklą, kadangi keitiklis yra integruotas į pačią stotelę, o ne į elektromobilį ir turi tiesioginę sąsają su automobilio baterija. Tokio tipo krovimas nėra apribotas elektromobilio keitikliais [5].

Nors DC tipo įkrovikliai yra patrauklesni dėl didesnių galimybių prisidėti prie V2G technologijos, jie įprastai yra brangesni nei įprasti AC tipo krovikliai. Daugelį AC tipo kroviklių kuriuos galima panaudoti galima rasti už mažiau nei 1000€, šiuo metu prieinamos DC tipo krovimo stotelės kurias būtų galima montuoti prie namų prieinamiems žmonėms yra gerokai brangesnės, įprastai siekiančios keliolika tūkstančių eurų. Tačiau vystosi DC krovimo stotelių įmonės, kurių pasiūlytas stoteles galėtų svarstyti ir privačių namų savininkai [6].



2 pav. Sigenergy SigenStor DC bidirekcinė įkrovimo stotelė [7]

### 1.1.3. V2G suderinami elektromobiliai ir baterijų technologijos

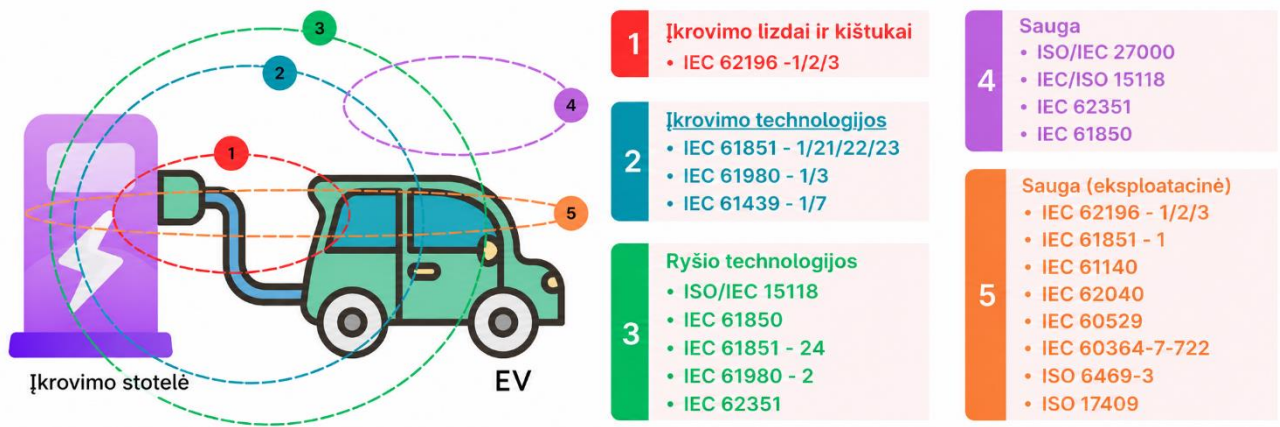
Ne visi elektromobiliai šiuo metu palaiko V2G technologiją, tačiau vis daugiau modelių yra suderinami su šia sistema [8]. V2G technologijai labiausiai tinka pilnai elektriniai elektromobiliai (angl. *BEV – battery electric vehicle*), kurie yra varomi tik elektra ir turi didelės talpos įkraunamas baterijas [8]. Jie yra tinkami dėl savo įprastai, didesnių akumuliatorių, kurie leidžia sukaupti didesnius energijos kiekius, kurie gali būti grąžinami į tinklą [8]. Nors įkraunami hibridiniai elektromobiliai (angl. *PHEV – plug in hybrid-electric vehicle*) taip pat gali būti suderinami su V2G, jų mažesnė baterijų talpa daro juos mažiau idealiais šioje panaudojimo srityje [8].

Šiuolaikiniuose elektromobiliuose dažniausiai naudojamos ličio jonų baterijos, kurios pasižymi dideliu energijos tankiu, santykinai ilgu tarnavimo laiku ir gebėjimu apdoroti dvipusį elektros srautą, todėl jos yra tinkamos V2G technologijai [8]. Vidutinė elektromobilio baterijos talpa yra apie 60 kWh, o tai yra šešis kartus daugiau nei tipinės 10 kWh namų saulės baterijos ir maždaug tris kartus daugiau energijos nei vidutinis namų ūkis sunaudoja per dieną [9]. Lengvųjų elektromobilių baterijos (apie 15–100 kWh) idealiai tinka mažesniems reikmėms, pavyzdžiui, individualiems pastatams, kur jos gali optimizuoti saulės energijos naudojimą ir pakeisti arba papildyti avarinius dyzelinius generatorius [10]. Sunkieji elektromobiliai, tokie kaip sunkvežimiai ir autobusai, turi dar didesnes baterijas (500–700 kWh), šios didesnės baterijos sukurią dar didesnę energijos kaupimo potencialą [11]. Pavyzdžiui, 20 sunkiųjų transporto priemonių, stovinčių vienoje depe, kiekviena su 500 kWh baterija, gali sudaryti bendrą bateriją kurios sukaupta energija sudaro 10 MWh, o tai atitinka maždaug 1000 Danijos namų ūkių dienos elektros energijos suvartojimą [11].

### 1.1.4. Komunikacijos protokolai ir valdymo sistemos

Efektyviam V2G veikimui būtina komunikacijos ir valdymo infrastruktūra. Ji skirstoma į dvi pagrindines dalis: priekinės (angl. *front-end*) ir galinės (angl. *back-end*) komunikacijos protokolus [12].

**Priekinės komunikacijos protokolai** yra atsakingi už ryšį tarp elektromobilio ir įkrovimo stotelės. Šie protokolai užtikrina saugų ir efektyvų įkrovimą, valdo duomenų mainus, skirtus įkrovimo procesui kontroliuoti, ir palengvina išmaniojo įkrovimo funkcijas. Svarbiausi standartai šioje srityje yra *IEC 62196* (kištukai), *IEC 61851* (įkrovimo technologijos) ir *ISO / IEC 15118* (komunikacija) [12]. *ISO 15118* yra vienas pagrindinių V2G standartų, skirtas užtikrinti komunikaciją tarp transporto priemonių ir įkrovimo infrastruktūros; nors *ISO 15118-20* nuolatinės srovės (DC) įkrovimas yra standartizuotas, kintamosios srovės (AC) įkrovimo standartas dar yra kuriamas [2]. Be to, saugumo standartai, tokie kaip *ISO / IEC 27000*, *IEC / ISO 15118*, *IEC 62351* ir *IEC 61850*, yra svarbūs siekiant apsaugoti komunikaciją ir duomenų mainus nuo kibernetinių grėsmių.



3 pav. Priekinės komunikacijos protokolų sąrašas [12]

**Galinės komunikacijos protokolai** reguliuoja ryšį tarp įkrovimo stotelės ir centrinės valdymo sistemos (CVS) arba debesų paslaugų [13]. CVS veikia kaip serveris, o įkrovimo stotelės – kaip klientai. Šie protokolai leidžia atlikti vartotojo autentifikavimą, atsiskaitymą ir nuotolinį stebėjimą. Tarp plačiausiai naudojamų galinės komunikacijos protokolų yra „Open Charge Point Protocol“ (OCPP), *IEC 63110*, „Open InterCharge Protocol“ (OICP) ir *IEEE 2030.5* (taip pat žinomas kaip „Smart Energy Profile 2.0“) [13]. *IEEE 2030.5* ypač svarbus, nes jis skirtas paskirstytų energijos išteklių, įskaitant elektromobilius, integravimui į tinklą. Nuotolinis valdymas per internetą leidžia pridėti naujus įrenginius, stebėti operacijas, atnaujinti programinę įrangą ir spręsti problemas, didinant efektyvumą ir mažinant išlaidas.

**Išmaniosios valdymo sistemos** yra svarbios V2G panaudojimui masinėje rinkoje, kadangi jos padeda spręsti problemas su akumuliatorių degradacija. Baterijų valdymo sistemos (BMS) atlieka esminį vaidmenį stebint ir kontroliuojant baterijos parametrus (įtampą, srovę, temperatūrą, įkrovos būseną), siekiant optimizuoti įkrovimo ir iškrovimo procesus bei sumažinti degradaciją [14]. Dažnio reguliavimo paslaugų teikimui V2G sistemoms reikalingas ryšys su automatizuotomis galios valdymo sistemomis, leidžiančiomis realiuoju laiku nustatyti, ar reikia tiekti, ar vartoti energiją [15].

## 1.2. V2G vaidmuo sisteminių paslaugų rinkoje

Sisteminės paslaugos yra būtinos elektros tinklo patikimumui ir saugumui užtikrinti. Jos apibrėžiamos kaip paslaugos, reikalingos užtikrinti, kad sujungta elektros sistema veiktų patenkinamai ir palaikytų priimtinus įtampos ir dažnio lygius [16]. V2G technologija siūlo lankstų ir decentralizuotą sprendimą šiems poreikiams patenkinti, ypač didėjant atsinaujinančių energijos šaltinių integravimui [15].

### 1.2.1. Sisteminių paslaugų apibrėžimas ir reikšmė

Sisteminės paslaugos yra patikimumo produktai, naudojami energijos perdavimui į apkrovas ir patikimumam elektros sistemos veikimui palaikyti [17]. Jos apima įvairias funkcijas, kurios užtikrina, kad elektros energijos tiekimas nuolat atitiktų paklausą, o tinklo parametrai (pvz., dažnis ir įtampa) išliktų stabiliose ribose. Šios paslaugos yra gyvybiškai svarbios, siekiant išvengti tinklo sutrikimų, tokių kaip pertrūkiai ar gedimai, ir užtikrinti nuolatinį, kokybišką elektros tiekimą [16].

## 1.2.2. V2G teikiamos sisteminės paslaugos

V2G sistemos gali teikti platų sisteminių paslaugų spektrą, gerindamos elektros tinklų stabilumą, patikimumą ir efektyvumą. Šios paslaugos gali būti tokios kaip dažnio reguliavimas, įtampos palaikymas, esant didelei elektros generacijai – piko apkrovos palaikymas ar netgi palengvinti atsinaujinančių energijos šaltinių integravimą į tinklą:

**Dažnio reguliavimas:** Dažnio reguliavimas yra būtinas tinklo stabilumui palaikyti, akimirksniu balansuojant pasiūlą ir paklausą [15]. V2G sistemos gali greitai reaguoti į tinklo dažnio svyravimus, tiekdamos arba vartodamos reaktyvią energiją, ir taip padėti palaikyti dažnį priimtinoje ribose. Tai ypač svarbu, nes atsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip vėjas ir saulė, kintamumas kelia naujų iššūkių dažnio stabilumui [18].

Dažnio palaikyme dalyvaujančios sistemos yra skirstomos į tris tipus:

FCR (angl. *Frequency Containment Reserve*) – Dažnio palaikymo rezervas (pirminis): Tai greičiausias automatinis atsakas į dažnio pokyčius. Jo pagrindinis tikslas yra sustabdyti dažnio kritimą ar kilimą ir stabilizuoti jį siaurame leistiname diapazone per kelias sekundes. FCR aktyvuojasi automatiškai, proporcingai dažnio nukrypimui, ir veikia iki maždaug 30 sekundžių [19]. Šio tipo rezervas įprastai suveikia per kelias sekundes.

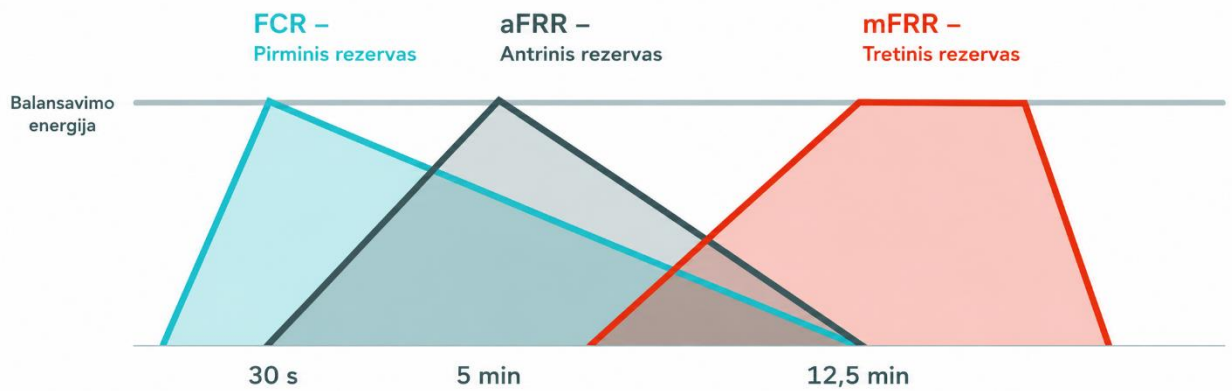
FCR tipo rezervą tiekiantys generatoriai turi galėti palaikyti dažnį 49,0–51,0 Hz diapazone. Taip pat turi galėti atlaikyti tinklo dažnio kitimus kurie neviršija 2,5 Hz/s. Šiame diapazone rezervas turi nustatyti veikimo laiką [20]:

**1 lentelė.** Minimalus FCR veiklos laikotarpis [20]

Dažnių diapazonas, Hz	Minimalus veikimo laikotarpis
47,5–48,5	Ne trumpesnė kaip 30 minučių
48,5–49,0	Ne trumpesnė kaip 30 minučių
49,0–51,0	Neribotas
51,0–51,5	Ne trumpesnė kaip 30 minučių

aFRR (angl. *Automatic Frequency Restoration Reserve*) – automatinis dažnio atstatymo rezervas (antrinis): Šis rezervas automatiškai įsijungia po FCR ir yra skirtas atkurti tinklo dažnį iki nominalios vertės (pvz., 50 Hz) ir atstatyti galios balansą sistemoje. aFRR veikia lėčiau nei FCR, paprastai suveikia per 30 sekundžių ir veikia iki 15 minučių [21].

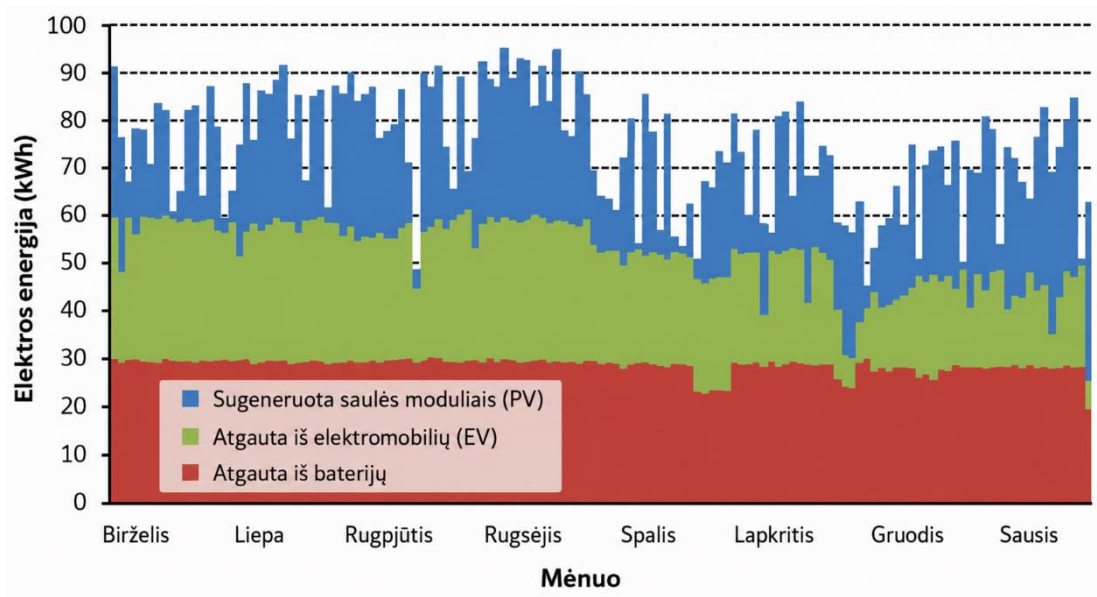
mFRR (angl. *Manual Frequency Restoration Reserve*) – rankinis dažnio atstatymo rezervas (trečias lygis): Tai lėčiausias dažnio valdymo rezervas, aktyvuojamas elektros tinklo operatorių rankiniu arba pusiau automatinio būdu. mFRR užduotis – galutinai atkurti tinklo dažnį iki nominalios vertės ir ilgam atstatyti galios balansą, paprastai per kelias minutes (nuo 10 iki 30 minučių). Jis naudojamas, kai pirminiai ir antriniai rezervai negali visiškai atkurti dažnio arba kai reikia spręsti ilgalaikius disbalansus [22].



4 pav. Dažnio atstatymo sistemų veikimo laikai[21]

**Įtampos palaikymas:** Įtampos palaikymas yra būtinas stabiliam ir patikimam tinklo veikimui. V2G sistemos gali kontroliuoti reaktyviają galią per galios keitiklius, taip prisidedamos prie įtampos reguliavimo ir užkertančios kelią įtampos kritimams ar šuoliams [15]. Tai padeda užtikrinti, kad tinklas veiktų priimtinoje įtampos ribose, apsaugant įrangą nuo tinklo įtampos šuolių ir užtikrinant patikimą energijos tiekimą [23].

**Piko apkrovos valdymas:** V2G leidžia elektromobiliams kaupti energiją, kai paklausa yra maža (pvz., naktį), ir grąžinti ją į tinklą piko valandomis, kai paklausa didžiausia dėl didelio suvartojimo [1]. Tai padeda sumažinti tinklo apkrovą, išvengti brangių infrastruktūros atnaujinimų ir sumažinti poreikį naudoti brangias ir taršias piko elektrines. Ši technologinė galimybė padeda išlyginti apkrovos kreivę ir žymiai sumažina piko apkrovos poreikį [24].



5 pav. Piko apkrovos „apkarpymas“ kai krovimas vyko iš saulės elektrinių[3]

**Atsinaujinančios energijos integravimas:** V2G palengvina atsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip saulės ir vėjo energija, integravimą, kaupiant energijos perteklių elektromobilių baterijose ir grąžinant jį į tinklą, kai reikia. Tai padeda sušvelninti atsinaujinančios energijos kintamos gamybos iššūkius, mažina priklausomybę nuo iškastinio kuro tinklo balansavimui ir prisideda prie tinklo

dekarbonizacijos [1]. Elektromobiliai gali vartoti saulės energijos perteklių dienos metu ir iškrauti ją, kad maitintų namus piko paklausos laikotarpiais arba tinklo gedimo atveju [25].

### 1.2.3. Generatorių reikalavimai

Kadangi elektromobiliai kurie turi V2G technologiją prie tinklo jiems gali būti taikomi tinklo generatorių reikalavimai. Šie reikalavimai yra detalai aprašyti „KOMISIJOS REGLAMENTAS (ES) 2016/631“. Elektromobiliai priklauso A grupės generatoriams jiems priklauso toliau vardinti reikalavimai ir apibrėžimai.

A grupės generatoriai paprastai apibūdinami pagal jų didžiausią pajėgumą ( $P_{max}$ ) ir prijungimo tašką. Bendroju ES lygiu A tipo moduliai yra tie, kurių prijungimo taškas yra žemiau 110 kV ir kurių didžiausias pajėgumas yra 0,8 kW (arba 800 W) ar didesnis, bet neviršija tam tikros slenkstinės vertės, nuo kurios modulis jau priskiriamas B tipui. Baltijos sinchroninėje zonoje šis slenkstis B tipui yra 0,5 MW (500 kW). Lietuvoje nacionalinėse taisyklėse dažnai nurodoma, kad A tipo generatoriai yra iki 250 kW ( $P_{max}$ ), su papildomais pogrupiais [26]:

- A0 tipo: didžiausias pajėgumas ne didesnis kaip 10 kW;
- A1 tipo: didesnis nei 10 kW, bet ne didesnis kaip 100 kW;
- A2 tipo: didesnis nei 100 kW, bet mažesnis nei 250 kW.

Pagrindiniai techniniai reikalavimai A grupės generatoriams [26]:

- dažnis: Tipinis veikimo diapazonas yra nuo 49 Hz iki 50,1 Hz nuolatiniam veikimui. Be to, generatoriai turi gebėti atlaikyti dažnio nukrypimus 47,5 Hz–51,5 Hz;
- įtampa: Įtampos diapazonas prijungimo taške paprastai turi būti nuo 0,9 iki 1,1 vardinės įtampos (t. y., 90 % iki 110 %  $U_n$ ). Taip pat nustatomi atsijungimo slenksčiai ir uždelsimai, pvz., esant 0,85  $U_n$  įtampai, atsijungimas per mažiau nei 3 sekundes, arba esant 1,25  $U_n$  įtampai, atsijungimas per 100 ms [26];
- aktyviosios galios valdymas: Nors A grupės generatoriams taikomi minimalūs automatizuoto atsako reikalavimai, jie turi turėti pagrindines aktyviosios galios valdymo galimybes. Minima kad reguliuojamo aktyviosios galios gradiento apribojimas, ne daugiau kaip 10 % [26].

Sinchronizacija: Prijungiant prie tinklo, sinchronizacijos įtaisai turi atitikti šiuos nuostatas [26]:

- įtampos skirtumas: Nuo 0 % iki +5 %;
- dažnio skirtumas: Ne daugiau kaip 0,067 Hz;
- fazinio kampo skirtumas: Nuo 0° iki +10°.

Apsaugos įtaisai: Turi būti įrengti apsaugos įtaisai, reaguojantys į viršįtampį, per žemą įtampą, per aukštą ir per žemą dažnį, su nustatytais atsijungimo uždelsimais [26].

Atsparumas triktims (angl. *Fault Ride Through*): nors šis reikalavimas yra labiau griežtas didesniems generatoriams, A tipo moduliams gali būti keliami kandidatiniai reikalavimai išlikti prijungtiems prie tinklo esant tam tikriems įtampos kritimams, nors su mažiau griežtomis kreivėmis ir trukmėmis [26].

### 1.3. Poveikis elektromobilių baterijoms

Kadangi V2G technologija naudoja elektromobilių baterijas, vienas iš dažniausiai keliamų klausimų yra jos poveikis elektromobilių baterijų ilgaamžiškumui. Žmonės naudodami savo elektromobilius gali būti susirūpinę elektromobilio baterijos ilgaamžiškumu ir talpa, dėl šių priežasčių vengti tokio tipo funkcijų kurios atiduoda energiją atgal į tinklą, o ne tiesiogiai suvartojamos to pačio žmogaus.

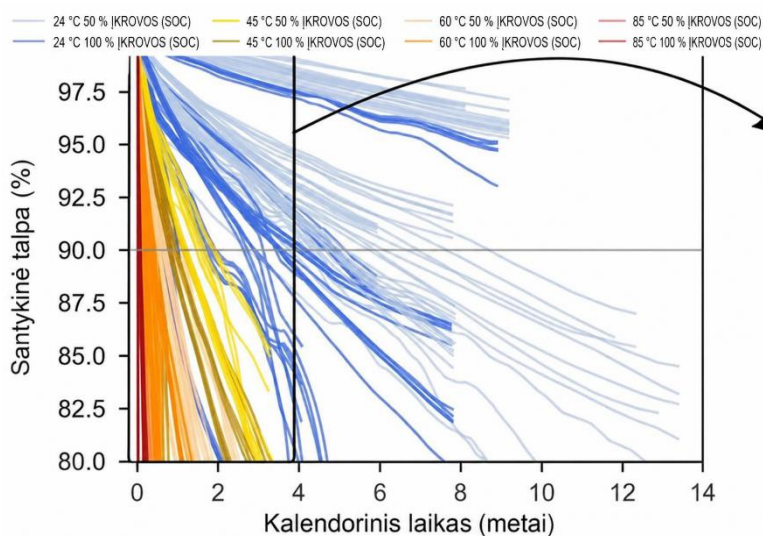
#### 1.3.1. Baterijų degradacijos didinimo vengimas

Įkraunamos baterijos turi baigtinį įkrovimo ciklų skaičių ir ribotą galiojimo laiką – jos nėra amžinos, todėl kyla pagrįstas susirūpinimas, kad V2G gali sutrumpinti baterijos tarnavimo laiką dėl dažnesnių įkrovimo ir iškrovimo ciklų. Daug kartų ir mažais laiko tarpais pasikartojantis pilnas baterijos įkrovimo ir iškrovimo ciklas, ypač jei jis nėra kruopščiai valdomas, gali pagreitinti nusidėvėjimą ir degradaciją, potencialiai sutrumpindamas EA baterijos tarnavimo laiką [27].

#### 1.3.2. Degradaciją įtakojantys veiksniai

Baterijos talpa yra kelių dedamųjų įtakojamas procesas, jis priklauso nuo baterijos chemijos, įkrovimo / iškrovimo greičio, temperatūros, įkrovos būsenos ir amžiaus. Pagrindiniai degradacijos veiksniai yra šie:

- **iškrovos gylis:** Tai yra baterijos talpos procentas, kuris iškraunamas naudojimo metu. Gilesni iškrovimai paprastai lemia greitesnę degradaciją [14];
- **įkrovimo/iškrovimo greitis (C-rate):** Įkraunant ir iškraunant baterijas dideliu greičiu, gali susidaryti šiluma, kuri pagreitina baterijos degradaciją [14]. Didelė galios išvestis yra svarbesnis degradacijos veiksnys nei bendras iškraunamos energijos kiekis [28];
- **darbinė temperatūra:** Ekstremalios temperatūros, tiek aukštos, tiek žemos, gali neigiamai paveikti baterijos veikimą ir tarnavimo laiką [14].
- **senėjimas:** Baterijos degraduoja laikui bėgant, net ir nenaudojamos, dėl vidinių cheminių reakcijų [14].



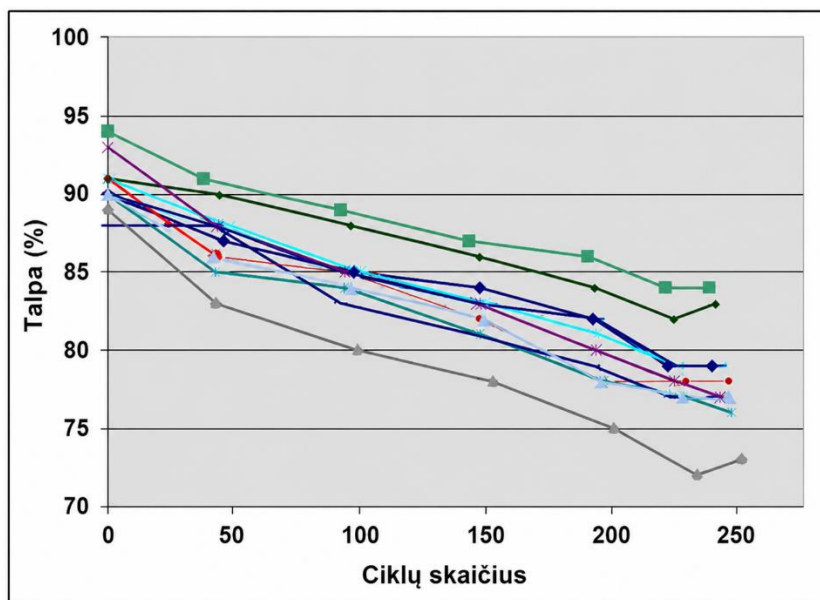
6 pav. Baterijų senėjimas [29]

#### 1.4. Degradacijos mažinimo strategijos ir teigiamas poveikis

Nepaisant susirūpinimo dėl baterijų degradacijos, daugelis tyrimų ir realaus pasaulio patirties rodo, kad V2G nebūtinai sutrumpina baterijos tarnavimo laiką [30]. Tai pasiekama įgyvendinant pažangias baterijų valdymo strategijas:

**Išmaniosios baterijų valdymo sistemos (BMS):** Baterijų valdymo sistemos yra svarbios optimizuojant V2G veikimą bei siekiant sumažinti degradaciją. Šios sistemos nuolat stebi baterijos parametrus (įtampą, srovę, temperatūrą ir įkrovos lygį) ir dinamiškai koreguoja įkrovimo ir iškrovimo greičius, kad būtų išvengta per didelio įkrovimo, gilaus iškrovimo ir per didelio šilumos generavimo [14].

**Seklus ciklas ir optimizuoti įkrovimo/iškrovimo greičiai:** Užtuot giliai iškraunant bateriją, V2G operacijos gali būti apribotos sekliais ciklais (pvz., tarp 65 % ir 75 % įkrovos lygio) [31]. Tai sumažina baterijos degradaciją. Lėtesni įkrovimo ir iškrovimo greičiai paprastai mažiau apkrauna bateriją [32]. Toks baterijos apkrovimo mažinimas suteikia galimybę baterijoms būti naudojamoms ilgesnį laiko tarpą.



7 pav. Baterijos talpos priklausymas nuo ciklų[31]

**Terminis valdymas:** Efektyvios terminio valdymo sistemos gali palaikyti baterijas optimaliame temperatūros diapazone, užkertant kelią perkaitimui ir užtikrinant efektyvų veikimą [33]. Kadangi baterijos turi optimalias veikimo temperatūras, terminis valdymas padeda iš baterijos išgauti ne tik didžiausią energijos naudojimo potencialą, bet tuo pačiu ir padeda ilginti jos gyvenimo ciklą.

**Naujos kartos baterijų technologijos:** Kuriamos pažangios baterijų rūšys, parenkami naujo tipo anodai ir katodai, kurie žada didesnę energijos tankį, greitesnį įkrovimą ir ilgesnį tarnavimo laiką [34]. Pavyzdžiui įmonės, kaip *Stellantis* ir *Factorial Energy* bendradarbiavimas pasiekė reikšmingą pažangą kietojo stovio baterijų kūrimo, tikimasi, kad demonstracinės transporto priemonės su šiomis baterijomis pasirodys jau 2026 m. [35].

## 1.5. Iššūkiai ir sprendimai

Nepaisant didelio V2G technologijos potencialo, jos plačiam diegimui kyla nemažai iššūkių, apimančių technologinius, reguliavimo, ekonominius ir socialinius aspektus, kurie reikalauja sprendimų, kad ši technologija taptų patrauklia.

### 1.5.1. Technologiniai iššūkiai

**Suderinamumas ir sąveikumas:** Didelė kliūtis V2G diegimui yra universalių standartų ir protokolų trūkumas. Šiuo metu skirtingi gamintojai naudoja įvairius įkrovos komunikacijos protokolus, o tai apsunkina V2G sistemų integravimą į esamą tinklo architektūrą [36].

**Dvipusių įkroviklių kaina ir prieinamumas:** Dvipusiai įkrovikliai šiuo metu yra brangūs (apie 10000 USD), nors buvo prognozuojama, kad didėjanti konkurencija iki 2025 m. pabaigos sumažins kainas iki 6000 USD [37]. Aukštos pradinės investicijų išlaidos yra reikšminga kliūtis diegimui.

### 1.5.2. Socialiniai ir vartotojų priėmimo iššūkiai

**Vartotojų nerimas dėl baterijos degradacijos ir ridos:** Dažnas įkrovimas ir iškrovimas gali sukelti nerimą dėl baterijos ilgaamžiškumo ir galimo ridos sumažėjimo. Nors tyrimai rodo, kad V2G gali net pagerinti baterijos tarnavimo laiką optimaliomis sąlygomis, šiuos rezultatus reikia aiškiai ir nuosekliai perteikti vartotojams [38].

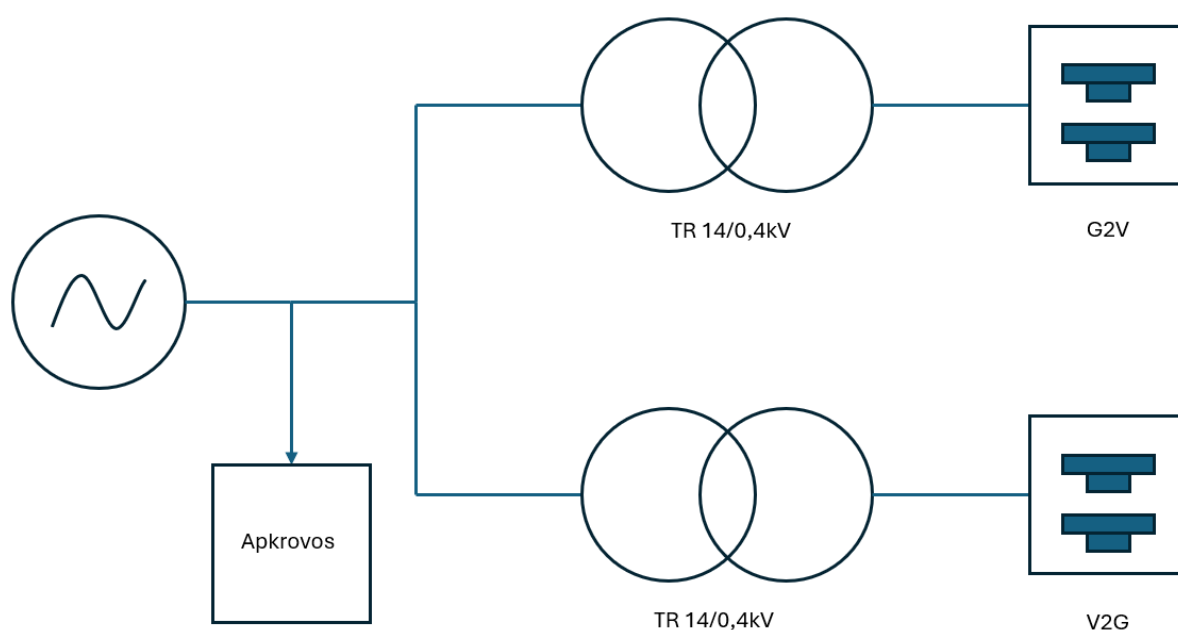
**Sunkiai suvokiama nauda vartotojui:** Nors V2G siūlo didelę naudą tinklui, tiesioginė nauda individualiems EV savininkams (be V2H / V2L) yra mažiau akivaizdi. Reikia aiškių finansinių paskatų ir edukacijos, kad vartotojai suprastų ir norėtų dalyvauti [39].

**Duomenų privatumas ir saugumas:** V2G sistemos remiasi skaitmenine komunikacija ir duomenų mainais, todėl kyla kibernetinio saugumo ir duomenų privatumo problemų. Kibernetinės atakos gali sukelti elektros energijos tiekimo nutraukimus, duomenų pažeidimus ir sistemos manipuliacijas, kompromituodamos kritinės infrastruktūros vientisumą [40].

## 2. Metodologinė dalis

**Tiriamasis objektas** – elektromobilių baterijos prijungtos prie energetikos tinklo naudojant V2G sistemą. Tinklas yra sudarytas iš generacijos šaltinio, dviejų transformatorių prijungtų prie dviejų baterijų. Šios baterijos simuliacijoje atstoja elektromobilius, kadangi simuliacijai yra aktuali sąveikia baterijos ir tinklo atveju. Viena bateriją atlieka G2V funkciją ir pastoviai kraunasi nuo tinklo, o antroji baterija atlieka V2G funkciją, pastoviai kraunasi, tačiau esant poreikiui į tinklą tiekia energiją atgal. Tinkle taip pat yra įdėtos trys apkrovos. Pirmoji apkrova yra pastoviai prijungta prie tinklo, antroji apkrova numatytu momentu yra prijungiama prie tinklo, o trečioji numatytu momentu yra atjungiamą nuo tinklo. Apkrovų prijungimo atjungimo metu kinta tinklo dažnis ir prijungtos automobilių baterijos bando šį nuokrypi kompensuoti.

V2G technologija remiasi prielaida, kad asmeninės transporto priemonės didžiąją laiko dalį (apie 90–95 %) praleidžia stovėdamos. Prijungtos prie išmaniosios įkrovimo infrastruktūros, jos sudaro didžiulį, nors ir paskirstytą, energijos kaupimo rezervą.



8 pav. Supaprastinta tinklo schema

Tiriamąojo objekto sudėtis:

- 25 MVA Sinchroninis generatorius;
- Keičiama pastovi apkrova;
- 1 MW prijungiama apkrova;
- 2 MW atjungiamą apkrova;
- Du 14/0,4 kV transformatoriai;
- Du srovės ir įtampos matuokliai;
- Du reaktyvios ir aktyvios galios matuokliai;
- Kintamos/Nuolatinės srovės keitiklis;
- V2G veikimo principo baterija;
- G2V veikimo principo baterija.

Tyrimui atlikti bus daromos šios prielaidos:

- Dažnis bus stebimas santykiniais vienetais;
- V2G baterija bus įkrauta iki 98 % simuliacijos pradžioje;
- G2V baterija bus įkrauta iki 70 % simuliacijos pradžioje;
- Kintamoji apkrova simuliacijos metu bus pastovi;
- Prijungiama ir atjungiamą apkrova bus pastovaus dydžio;
- Tinklo nuostoliai nebus simuliuojami;
- Vidiniai baterijos procesai nebus simuliuojami;
- Tinklas „be elektromobilių“ bus simuliuojamas naudojant 1 elektromobilį dėl modeliavimo programos apribojimų;
- Bus simuliuojamas 50 sekundžių laiko periodas;
- Po 10 sekundžių prijungiama 1 MW apkrova;
- Po 30 sekundžių atjungiamą 2 MW apkrova;
- Simuliacijos pradžioje susidarę tinklo nuokrypiai bus ignoruojami dėl tinklo startavimo proceso;
- Tiriamas bus pirminis dažnio palaikymo rezervas (FCR).
- Maksimali krovimosi galia elektromobiliui 75 kW
- Maksimali išsikrovimo galia elektromobiliui 15 kW

## 2.1. Modeliavimo technikos

Modeliuojant V2G veikimą reikia pasirinkti modeliavimo techniką. Modeliuojant V2G veikimą galimi modeliavimo pasirinkimai:

### Model Predictive Control (MPC) – Prognozuojantis valdymas

Šis metodas leidžia ne tik reaguoti į esamą sistemos būseną, bet ir prognozuoti baterijos įkrovos lygio bei elektros energijos kainų pokyčius artimiausiame laiko intervale, kiekviename valdymo žingsnyje sprendžiant optimizavimo uždavinį, skirtą kaštams ar tinklo nuokrypiams minimizuoti [41].

### Metaeuristiniai optimizavimo metodai (PSO, Genetic algorithms)

Tokie metodai kaip *Particle Swarm Optimization* (PSO) ir genetiniai algoritmai (*Genetic Algorithms, GA*), taikomi didelio masto V2G sistemose, kai optimizavimo uždavinys tampa pernelyg sudėtingas tradiciniams matematiniais metodams. Šie metodai leidžia efektyviai ieškoti artimų optimaliems sprendimų, pavyzdžiui, optimalių elektromobilių įkrovimo ir iškrovimo grafikų [42].

### Ekvivalentinės grandinės modeliavimas (ECM)

Yra taikoma baterijų modeliavimo technika *Simulink* ir *Simscape Electrical* aplinkose. Šiuo metodu baterija atvaizduojama ne molekulinio lygmeniu, bet kaip elektros grandinė, sudaryta iš įtampos šaltinio, rezistorių ir kondensatorių, dažniausiai taikant *Thevenin-o* modelį. Toks modeliavimas leidžia realiuoju laiku tiksliai simuliuoti baterijos elektrinius ir šiluminius procesus bei yra būtinas vertinant baterijos degradaciją V2G veikimo metu [43].

### Fizikinis modeliavimas

Taikomas V2G technologijų analizėje siekiant aprašyti elektrocheminius, elektrinius ir mechaninius procesus. Šie modeliai, kuriami *MATLAB / Simscape Electrical* aplinkoje, remiasi fundamentaliais

fizikos dėsniais, tokiais kaip energijos tvermė, Omo dėsnis ir termodinaminiai procesai, ir leidžia tiksliau įvertinti sistemos veikimą, lyginant su supaprastintais loginiais modeliais [43].

Atliekant šį darbą bus naudojamas fizikinis modeliavimas, kadangi jis leidžia lengvai keisti tinklo, elektromobilių ar apkrovų parametrus. Šio darbo metu nėra svarbi elektromobilių degradacija ar ypač detalūs procesai vykstantys tinkle.

## 2.2. Modeliavimo programinė įranga

Modeliuojant V2G technologijos veikimą sisteminių paslaugų rinkoje, gali būti naudojamos įvairios programinės įrangos. Programinės įrangos gali skirtis savo paskirtimi, lankstumu ar analizės lygiu. Šios įrangos pasirinkimas priklauso nuo tyrimo pobūdžio – ar orientuojamasi į optimizavimą, elektros tinklo analizę, rinkos modeliavimą, ar vartotojų elgsenos vertinimą.

Simuliacijos modeliui sukurti buvo pasirinkta *Matlab Simulink* programinė įranga. Ši programa pasirinkta dėl to, nes turi galimybę modeliuoti elektros energijos sistemas naudojant fizikinius komponentus, o ne tik remiantis matematinėmis lygtis. Simuliuojant V2G sistemas tai yra pravartu, kadangi tai leidžia viename modelyje integruoti:

Elektromobilių baterijas galima simuliuoti baterijos įkrovos lygį (SoC), sveikatos būklę (SoH) ir degradaciją, kuri gali atsirasti dėl dažnų ciklų.

Galios keitiklius – AC / DC, DC / DC bei DC / AC keitiklių modeliavimas leidžia išanalizuoti dvikryptį energijos srautą, taip leidžia pamatyti nuostolius ir efektyvumą.

Sinchroninius generatorius – simuliuojant jų galią bei dažnį galima stebėti kokią įtaką padaro elektromobiliai su V2G funkcija tinklui.

*Matlab* programa taip pat turi įrankius, tokius kaip *Control System Toolbox* ir *Optimization Toolbox*, kurie gali padėti modelyje nuspręsti kada elektromobilis turėtų krauti, o kada išsikrauti. Taip pat galima panaudoti *Model Predictive Control* (MPC) metodą, jis leidžia optimizuoti V2G modeliavimą atsižvelgiant į elektros kainų svyravimus, tinklo apkrovą ir vartotojo poreikius.

## 2.3. Elektromobilių baterijos talpa

Kadangi ne visi elektromobiliai turi V2G technologijos panaudojimo galimybes, jie nėra tinkami paskaičiuoti simuliuojamos baterijos talpai. Elektromobilių baterijos talpai sudaryti bus pasirenkami elektromobiliai kurie galėtų atitikti skirtingas automobilių klases kurios yra sutinkamos kelyje. Talpos sudarymui bus remiamasi pasirinkus 4 elektromobilius:

*Renault 5 E-Tech* – kompaktiškas elektrinis hečbekas. Jis siūlomas su skirtingų talpų baterijomis (apie 40–52 kWh), kurių dėka WLTP cikle nuvažiuojamas atstumas gali siekti iki ~400 km, ir keliomis galios versijomis. Šis modelis orientuotas į miestų bei priemiesčio naudojimą [44]. Šie automobiliai yra nedideli ir panašūs į *Toyota Yaris* modelį kuris yra mažas miesto automobilis.

*Volkswagen ID.4* – vidutinės klasės elektrinis krossoveris, gaminamas nuo 2020 m. Tai erdvus, penkių sėdynių automobilis, pasižymintis įvairių baterijų pasirinkimu (apie 52–77 kWh) ir „Pasaulinė lengvųjų transporto priemonių bandymų procedūra“ (angl. *WLTP*) nuvažiuojamo atstumo diapazono režiu nuo ~350 km iki ~570 km, priklausomai nuo versijos ir baterijos talpos. Modelis yra vienas

populiariausių *Volkswagen* elektrinių automobilių dėl subalansuoto našumo ir praktiškumo naudoti šeimoms bei individualiems poreikiams [45].

*Nissan Leaf* – vienas žinomiausių ir ilgiausiai gaminamų masinių elektromobilių, pasižymintis praktišku hečbeko dizainu ir geru kasdienio naudojimo diapazonu. Naujesni *Leaf* variantai turi stambesnes baterijas (52–75 kWh), todėl nuvažiuojamas atstumas gali siekti iki ~600 km pagal tam tikrus „Pasaulinė lengvųjų transporto priemonių bandymų procedūros“ įvertinimus [46]. Nors šių elektromobilių senesni modeliai gali būti mažiau patrauklūs dėl mažesnio nuvažiuojamo atstumo, tačiau jie yra pakankamai patogūs naudoti kaip miesto mašinos bei turi reikalingą V2G funkcijos palaikymą.

*Kia EV9* – didelis trijų eilių elektrinis SUV, pasižymintis komfortiška ir modernia salono konfigūracija bei didesniu baterijos paketu (iki ~100 kWh), kuris leidžia nuvažiuoti ~400–500 km diapazone. Modelis orientuotas į šeimas bei ilgų kelionių segmentą, turi pažangią multimedijos įrangą ir bendrą didelio SUV funkcionalumą [47]. Nors modelis yra mažiau praktiškas kasdieniniame vartojime, tačiau dėl mėgstamų didesnių mašinų jis gali būti galimas pasirinkimas. Taip pat jo baterijos talpa leidžia naudoti šį elektromobilį kaip atsarginę bateriją, aprūpinti namus elektra.

Pasirinkti elektromobiliai atitinka įvairius poreikius. Kiekvieno elektromobilio baterijos talpa buvo pasirinkta kaip vidutinė didžiausios ir mažiausios talpos baterijų. Bendras vidutinis elektromobilių baterijos talpos kiekis siekia 69 kWh.

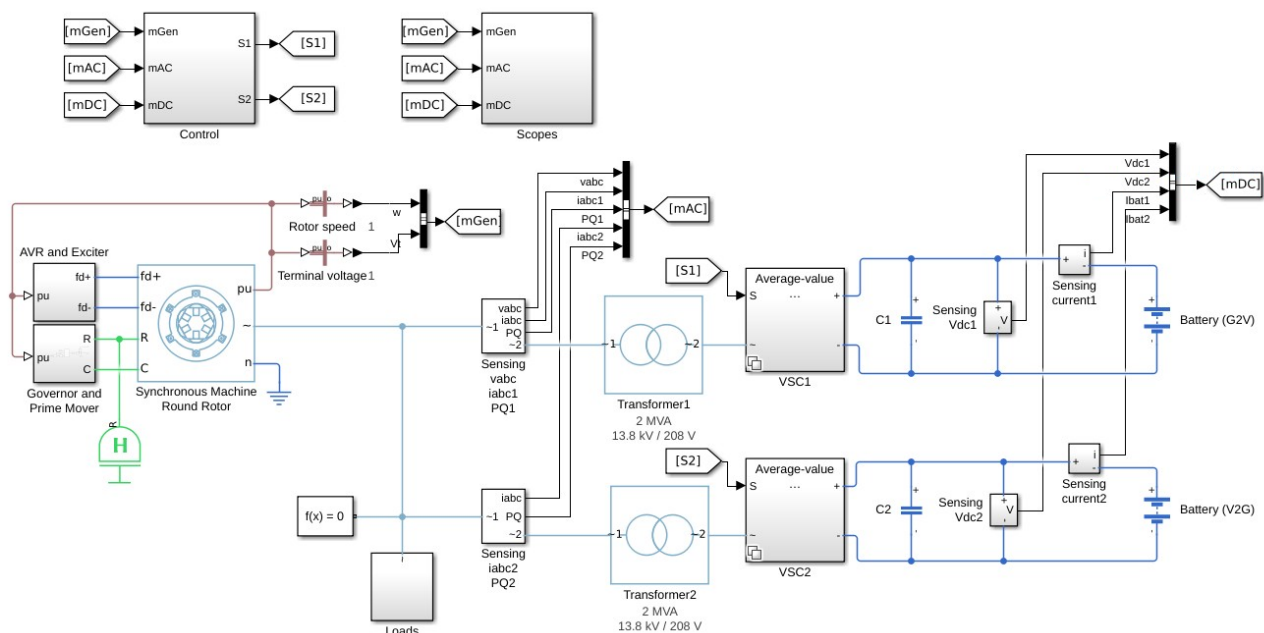
**2 lentelė.** Pasirinktų elektromobilių su V2G vidutinė baterijos talpa

Elektromobilis	Vidutinė talpa
Renault 5 E-Tech	46 kWh
Volkswagen ID.4	65 kWh
Nissan Leaf	64 kWh
Kia EV9	100 kWh
Vidutinė bendra baterijos talpa	69 kWh

Dėl paprastumo simuliacijoje bus pridama 1 kWh prie vidutinės bendros talpos. Taip gaunama 70 kWh elektromobilių baterija kuri atstos vieno elektromobilio talpą.

#### 2.4. Matematinis modelis ir jo analizė

Simuliuoti V2G pagalbą sisteminių paslaugų rinkoje buvo pasirinktas oficialus *Matlab* sukurtas modelis. *The MathWorks, Inc.* sukūrė modelį kuriame yra simuliuojamas mikrotinklas su V2G baterijomis. „Mikrotinklas su elektriniais automobiliais, palaikantis V2G (Vehicle-to-Grid) technologiją“ (angl. *Microgrid with Electric Vehicles V2G (Vehicle-to-Grid) Support*) [48]. Šis modelis bus naudojamas tirti kaip elektromobiliai padeda palaikyti tinklo dažnį kai yra prijungiami ir atjungiami apkrova. Dažnis bus tiriamas santykiniais vienetais ir atsistatymo laiko tarpu bei stebima reaktyvi ir aktyvi baterijų energijos dalis su įkrovos lygiu. Tokio tipo modelis yra tinkamas vertinti elektromobilių su V2G funkciją tinklui.



9 pav. Tiriamas tinklo modelis „Microgrid with Electric Vehicles V2G (Vehicle-to-Grid) Support“

Modelio simuliacijoje kaip pagrindinis energijos šaltinis yra sinchroninio generatoriaus blokas, prie kurio yra prijungti trys papildomi blokai:

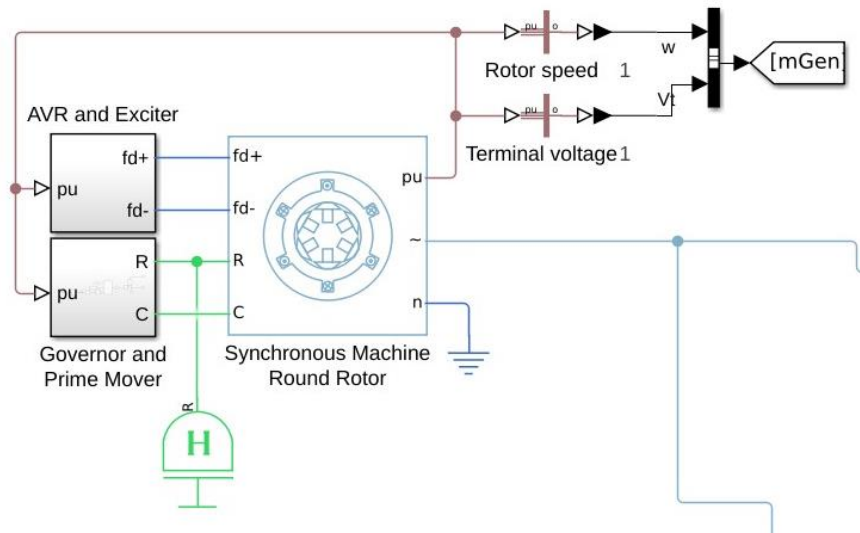
Automatinis įtampos reguliatorius (AVR) (angl. *Automatic Voltage Regulator*) ir sužadinimo sistemos blokas sudaro valdymo grandinę. AVR nuolat lygina generatoriaus išėjimo įtampą su nustatyta referencine verte, ir, įvertinęs nuokrypį, suformuoja valdymo signalą. Šis signalas perduodamas žadinimo sistemai, kuri generuoja rotoriaus žadinimo įtampą ir taip reguliuoja generatoriaus magnetinį lauką. Tokiu būdu užtikrinamas stabilus generatoriaus įtampos palaikymas.

„Governor“ blokas – greičio reguliatorius stebi generatoriaus sukimosi dažnį ir, jam nukrypus nuo nustatytos vertės, koreguoja valdymo signalą. Pagal šį valdymo signalą „Prime mover“ blokas mechaniškai reguliuoja generatoriaus sukimąsi.

Taip pat yra prijungtas inercijos blokas kuris palaiko generatoriaus sukimąsi, kai įvyksta staigūs pakeitimai, pavyzdžiui atjungiant ar prijungiant daug vartojančias apkrovas tinkle ir neleidžia generatoriui staigiai sustoti ar sulėtėti.

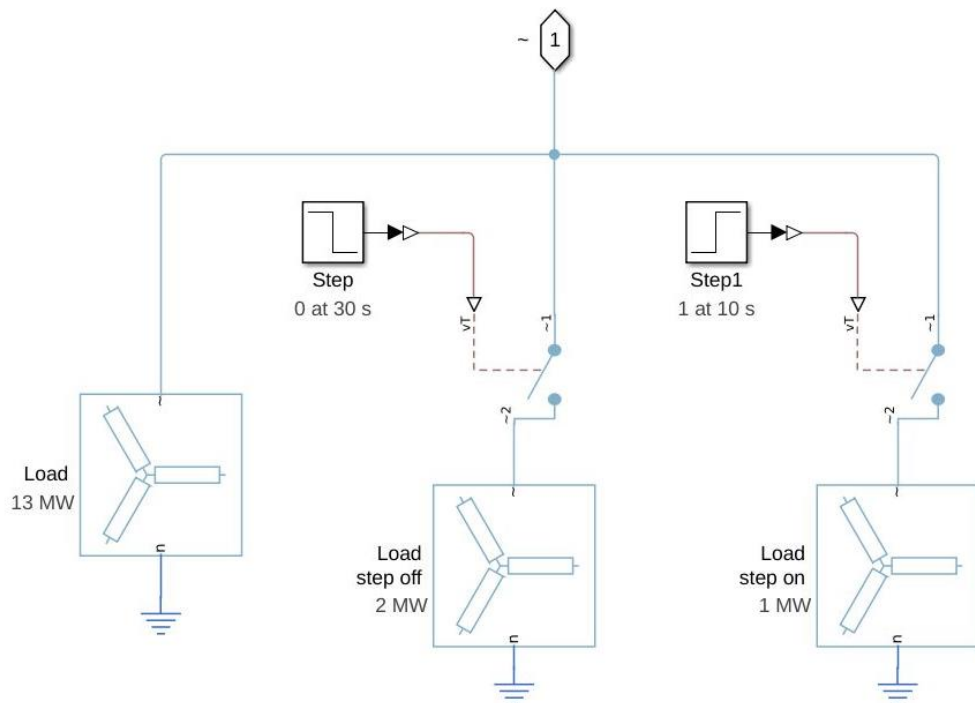
Iš sinchroninio generatoriaus yra imamas rotoriaus greičio signalas bei įtampos kurie perduodami kontrolės blokui. Kontrolės bloke yra atliekami skaičiavimai ir logikos tikrinimas naudojant papildoma informaciją iš kitų blokų.

Generatoriaus nominalioji įtampa buvo pakeista iš 13,8 kV į 14 kV, veikimo dažnis buvo pakeistas iš 60 Hz į 50 Hz, kad atitiktų Lietuvos tinklo dažnį. Nominalioji generatoriaus galia buvo palikta 25 MVA.



**10 pav.** Sinchroninio generatoriaus modelio dalis

Po generatoriaus tinkle yra prijungiamos trys apkrovos. Viena iš apkrovų yra 13 MW tai yra pagrindinė pastovioji apkrova, kuri tyrimo metu nebus keičiama. Taip pat yra prijungtos 1 MW ir 2 MW apkrovos. Jos simuliacijos metu tinkle dirbtinai sukels dažnio nuokrypį nuo standartinio. Šis nuokrypio sukėlimas vykdomas kai praėjus 10 sekundžių po simuliacijos pradžios jungiklis prijungia 1 MW apkrovą, taip bus sumažinamas dažnis dėl padidėjusios tinklo apkrovos, sumažės rotoriaus greitis. Praėjus 30 sekundžių po simuliacijos pradžios jungiklis atjungs 2 MW apkrovą nuo tinklo. Tokiu būdu turėtų išaugti tinklo dažnis, dėl padidėjusio rotoriaus greičio. Šiuos sugeneruotus tinklo nuokrypius bus bandoma kompensuoti naudojantis elektromobilių baterijomis.



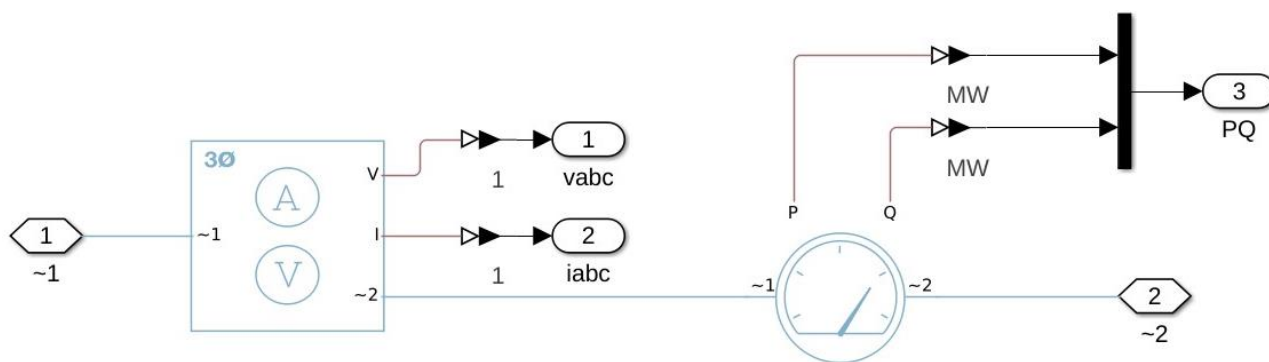
**11 pav.** Tinkle prijungta pastovi apkrova su viena prijungiama ir kita išjungiama apkrova

Toliau tinkle yra įdėti „Sensing“ blokai, šių blokų viduje yra sudaryta papildomų blokų sistema. Šioje sistemoje yra įdėtas įtampos ir srovės matavimo blokas kuris perduoda įtampos ir srovės rodmenis į  $v_{abc}$  ir  $i_{abc}$  išėjimo jungtis, ši informacija toliau perduodama skaičiavimo ir atvaizdavimo blokams. Po įtampos ir srovės matavimo bloko yra įdėtas trifazis galios jutiklis (angl. *Power Sensor*). Blokas „Galios jutiklis (trifazis)“ įgyvendina idealų jutiklį, skirtą aktyviosios ir reaktyviosios galios matavimui subalansuotose arba nesubalansuotose trifazėse grandinėse [49].

Kiekvienai nurodytai harmonikai  $k$  blokas apskaičiuoja aktyvią ir reaktyvią galia naudojant šią fazorių lygtį [50]:

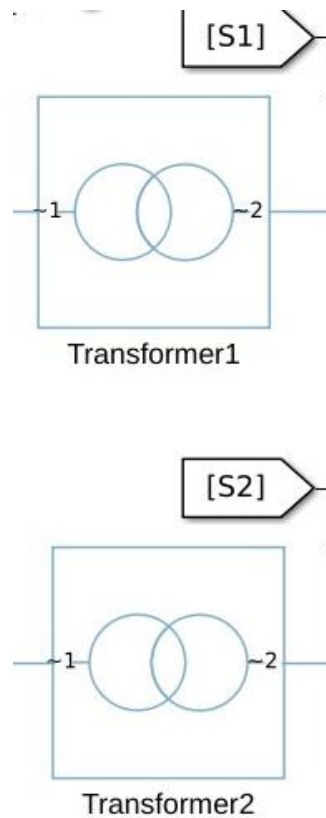
$$P_k + jQ_k = \frac{3}{2} (V_k e^{j\theta_{V_k}}) (\overline{I_k e^{j\theta_{I_k}}}); \quad (1)$$

čia  $P_k$  – aktyvioji galia;  $Q_k$  – reaktyvioji galia;  $V_k e^{j\theta_{V_k}}$  – fazorius, atspindintis pasirinktos sekos  $k$  – komponentės įtampą;  $\overline{I_k e^{j\theta_{I_k}}}$  – kompleksinis konjugatas  $I_k e^{j\theta_{I_k}}$  fazoriaus, atspindinčio  $k$  – komponento srovę pasirinktos sekos;  $V$  – įtampa;  $I$  – srovė,  $\theta$  – fazės kampas.



12 pav. Įtampos ir srovės matavimo blokas bei galios jutiklio blokas

Prie „Sensing“ blokų yra prijungti du galios transformatoriai. Pirminėje simuliacijoje jie buvo parinkti, kad atlieka keitimą iš 13,8 kV į 208 V. Šių transformatorių pirminės ir antrinės apvijų įtampos simuliacijai buvo pakeistos aukštoje įtampos pusėje iš 13,8 kV į 14 kV. Žemoje įtampos pusėje įtampa buvo pakeista iš 208 V į 230 V mažinamoji pusė kadangi ji atitinka Lietuvos namų rinkos įtampą. Simuliacijoje naudojami du transformatorių blokai, vienas transformatoriaus blokas prijungtas prie G2V baterijos, o antras transformatorius prijungtas prie V2G baterijos.



13 pav. Transformatoriaus blokai simuliacijos modelyje

Po transformatoriaus yra įdėti du vidutinės vertės įtampos šaltinio keitiklio (trifazis) blokai (angl. *Average-Value Voltage Source Converter (Three-Phase)*). Šis blokas turi du veikimo principus, vienu atveju jis veikia laiko keitimo principu, o kitu – laiko / dažnio veikimo principu. Simuliacijai bus naudojamas laiko / dažnio veikimo principas, kadangi šiuo atveju keitimas vyksta naudojant sinusoidę kuri buvo sukurta sinchroninio generatoriaus. Šio bloko darbas yra versti kintamą srovę į nuolatinę arba iš nuolatinės į kintamą, keitimo procesas yra daromas pagal trifazę moduliacijos bangą. Konvertavimas iš kintamos į nuolatinę srovę šiame bloke yra atliekamas naudojant kvadratų vidurkio metodą „RMS“ (angl. *Root Mean Square*). Šiam keitimui į nuolatinę srovę yra naudojamos šios formulės [51]:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{(U_a - U_b)^2 + (U_b - U_c)^2 + (U_c - U_a)^2}{3}}; \quad (2)$$

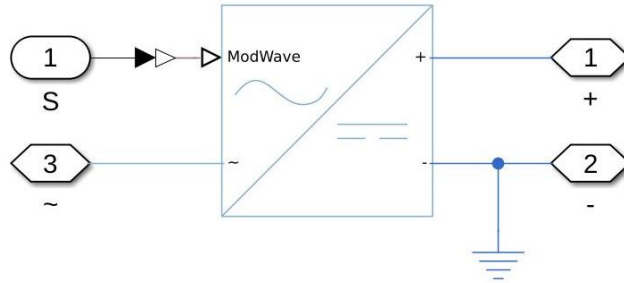
čia  $U_{rms}$  – vidutinė kvadratinė įtampa;  $U_n$  – A, B ir C fazių įtampos keitiklyje.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{(I_a - I_0)^2 + (I_b - I_0)^2 + (I_c - I_0)^2}{3}}; \quad (3)$$

čia  $I_{rms}$  – vidutinė kvadratinė srovė;  $V_n$  – A, B ir C fazių srovės keitiklyje;  $I_0$  – nulinės sekos srovė keitiklio kintamosios srovės pusėje.

Nulinės sekos srove keitiklio kintamosios srovės pusėje yra apskaičiuojant naudojant šią formulę [51]:

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}. \quad (4)$$

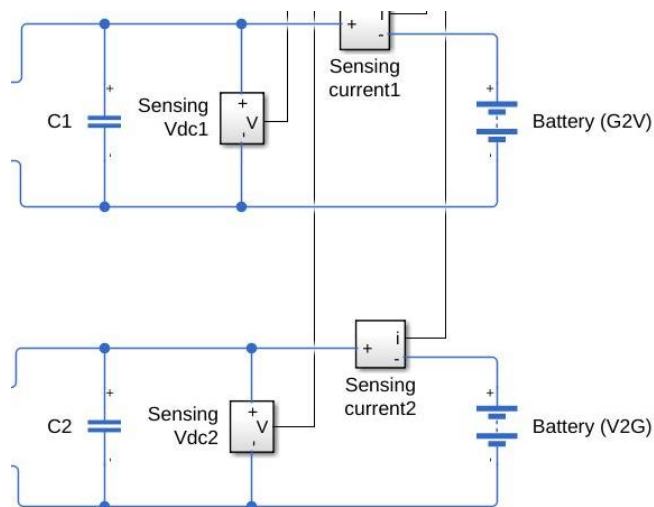


14 pav. Kintamos / nuolatinės srovės keitiklio blokas naudojantis vidutinės vertės metodą

Po kintamos/nuolatinės srovės keitimo yra prijungiamas baterijų sistema. Simuliacijoje yra naudojamos dvi sistemos, V2G ir G2V, jų baterijų sudėtis yra identiška, tačiau skiriasi veikimo principas. G2V baterija neturi galimybės į tinklą atiduoti elektros energijos ir ją gali tiktais pasiimti, ši funkcija yra valdoma sudaryto kontrolės bloko. Prieš baterijos bloką yra įrengtas kondensatorius kuris padeda išlyginti likusius nuokrypius po kintamos/nuolatinės srovės keitimo. Po kondensatoriaus yra įdėti blokai, matuojantys baterijos įtampą ir srovę prieš bateriją, ši informacija yra perduodama į baterijos įkrovos skaičiavimo bloką. Baterijos įkrovos lygis yra skaičiuojamas pagal šią formulę [52]:

$$SoC_{AH}(t) = SoC(t) + \frac{\eta_c \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi}{C_N} \quad (5)$$

čia  $SoC_{AH}(t)$  – baterijos įkrovos vertė laiko momentu  $t$ ;  $SoC(t)$  – baterijos įkrovos vertė pradiniam laiko momentu  $t_0$ ;  $C_N$  – nominali talpa;  $i(\xi)$  – srovė laiko momentu  $\xi$  (teigiama įkrovimo metu ir neigiama iškrovimo metu);  $\eta_c$  – krovimo efektyvumas.



15 pav. Baterijos, kondensatoriaus ir įtampos ir srovės matavimo blokai

### 3. Tiriamoji dalis

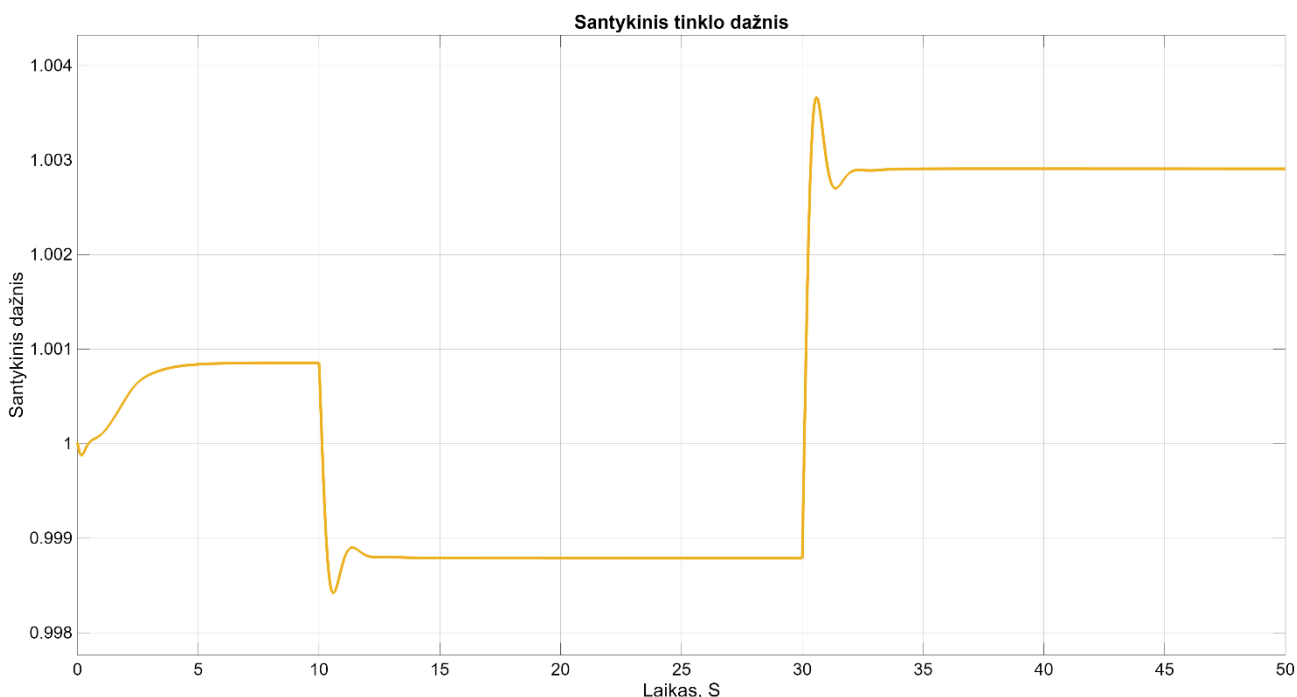
Tyrimui atlikti yra atliekamas simuliacijos modeliavimas kai traktuojama, kad tinklas dirba be elektromobilių, tai yra prijungtas tik vienas elektromobilis dėl simuliacijos programos negalėjimo simuliuoti tinklo su nuliu elektromobilių. Atliekant tiriamąjį darbą bus simuliuojami šie scenarijai:

- tinklas su vienu elektromobiliu – „tuščias tinklas“;
- tinklas su penkiais elektromobiliais;
- tinklas su dešimt elektromobilių;
- tinklas su dvidešimt elektromobilių;

#### 3.1. Simuliacija su 13 MW pastovia apkrova ir 1 V2G elektromobiliu:

Atlikus simuliacija su 1 elektromobiliu iš gautų grafikų simuliacijoje matome, kad tinklo dažnis simuliacijoje užtrunka apie 4 sekundes kol tampa pastovus ir jo santykinis dažnis siekia  $\sim 1,0009$  s.v.. Po 10 sekundžių yra prijungiama 1 MW apkrova ir dėl jos tinkle matosi dažnio kritimas, jis nukrenta iki santykinio  $0,9984$  ir nusistovi per  $\sim 3,4$  sekundės, nusistovėjus santykinis dažnis yra fiksuojamas  $0,9988$  s.v. Po 30 sekundžių yra atjungiamas 2 MW apkrova ir santykinis dažnis kyla iki  $1,0037$  s.v. , per  $\sim 4,2$  sekundės dažnis nusistovi ir pasiekia santykinį  $1,0029$  s.v. dažnį.

Iš reaktyvios ir aktyvios ir aktyvios galios grafikų galima matyti, kad jie yra pastovūs, tačiau ši informacija traktuojama kaip neaktuali, nes simuliacija negali veikti su nuliniu elektromobilių kiekiu dėl simuliacijos apribojimų.

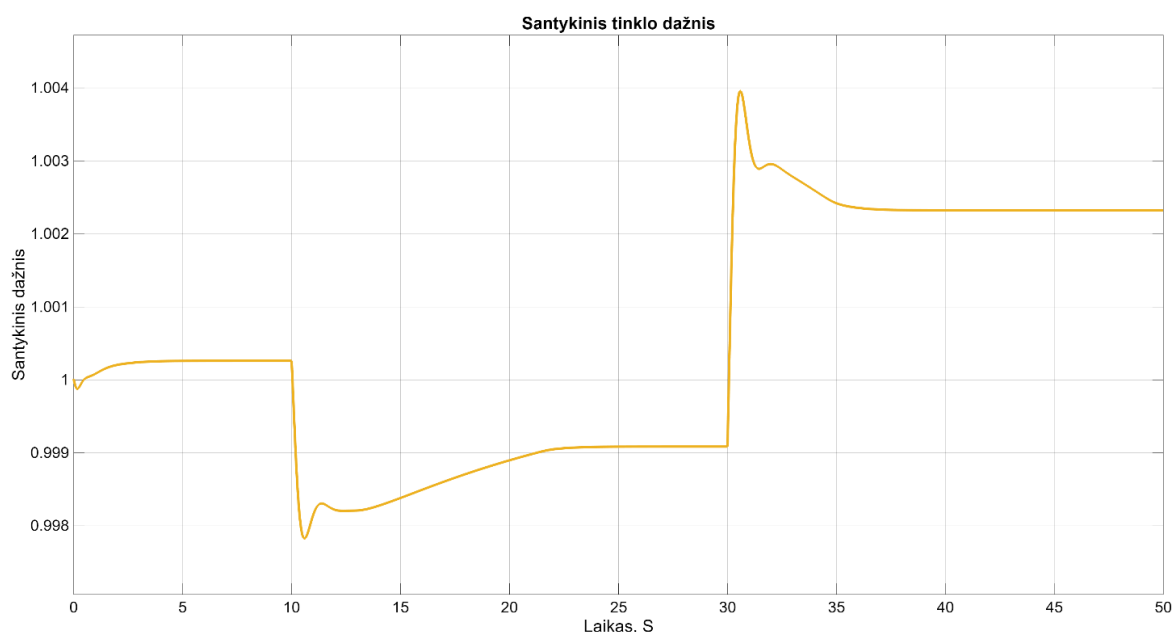


16 pav. Santykinis tinklo dažnis „be elektromobilių“

#### 3.2. Simuliacija su 13 MW pastovia apkrova ir 5 V2G elektromobiliu:

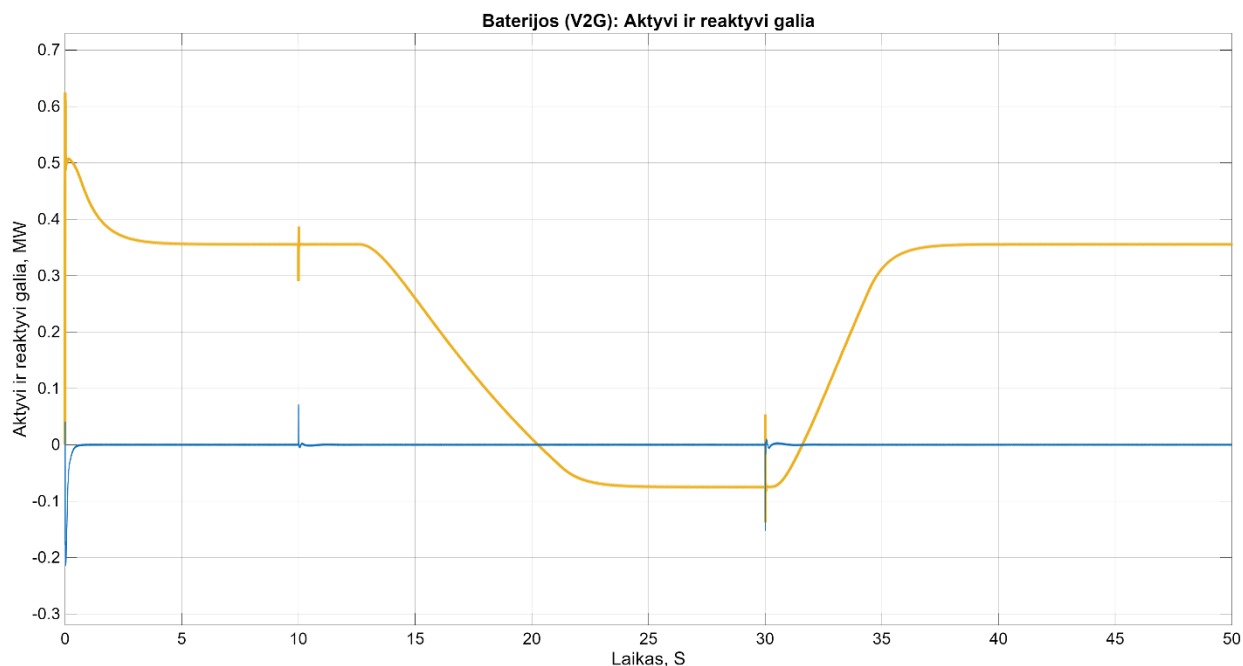
Prie tinklo prijungus 5 elektromobilius su V2G yra atliekamas toks pat skaičiavimas. Iš grafiko paimti duomenys rodo, kad tinklas per  $\sim 12,5$  sekundės pasiekia santykinį  $1,0003$  dažnį. Po 10 sekundžių prijungus 1 MW apkrovą tinklo santykinis dažnis nukrenta iki  $0,9988$  s.v. ir per  $12,5$  sekundės iš lėto kyla kol pasiekia stabilų  $0,9991$  santykinį dažnį. Po 30 sekundžių yra atjungiamas 2 MW apkrova ir

šįkart santykinis dažnis pakyla iki 1,0034, per 7,2 sekundės santykinis dažnis stabilizuojasi ties 1,0023 s.v.



17 pav. Santykinis tinklo dažnio grafikas su 5 V2G EA

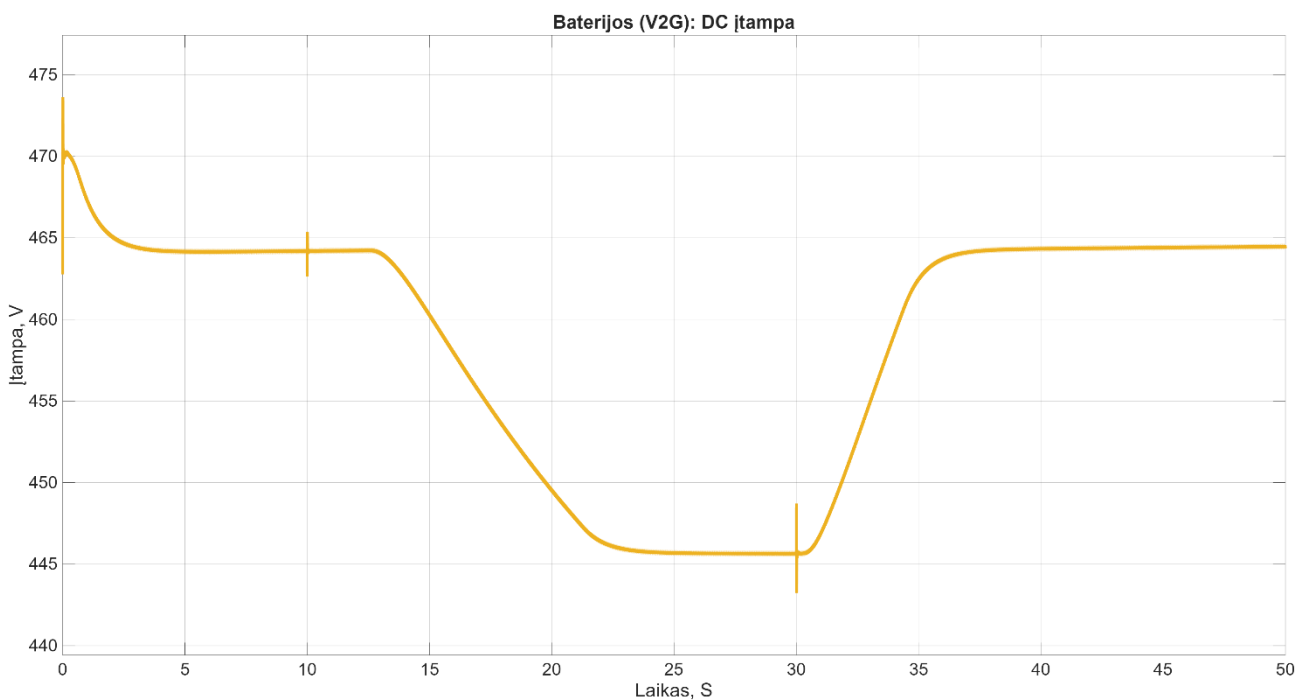
Po 1 MW apkrovos prisijungimo matoma, kad V2G elektromobilių baterijos atiduodama aktyvioji galia nukrenta iš 0,354 MW iki -0,076 MW. Perėjimas į negatyvią rodo, kad elektromobiliai pradėjo atiduoti sukauptą energiją atgal į tinklą. O po 2 MW apkrovos atjungimo aktyvioji galia pakyla iki 0,355 MW, tai rodo kad automobiliai vėl pradėjo krauti dėl tinklo pakilusio dažnio. Iš grafiko galima matyti, kad elektromobiliai ne iš karto aktyvuojasi, o užtrunka kelias sekundes kol pradeda tiekti FCR tipo paslaugą.



18 pav. V2G baterijos galia su 5 V2G EA

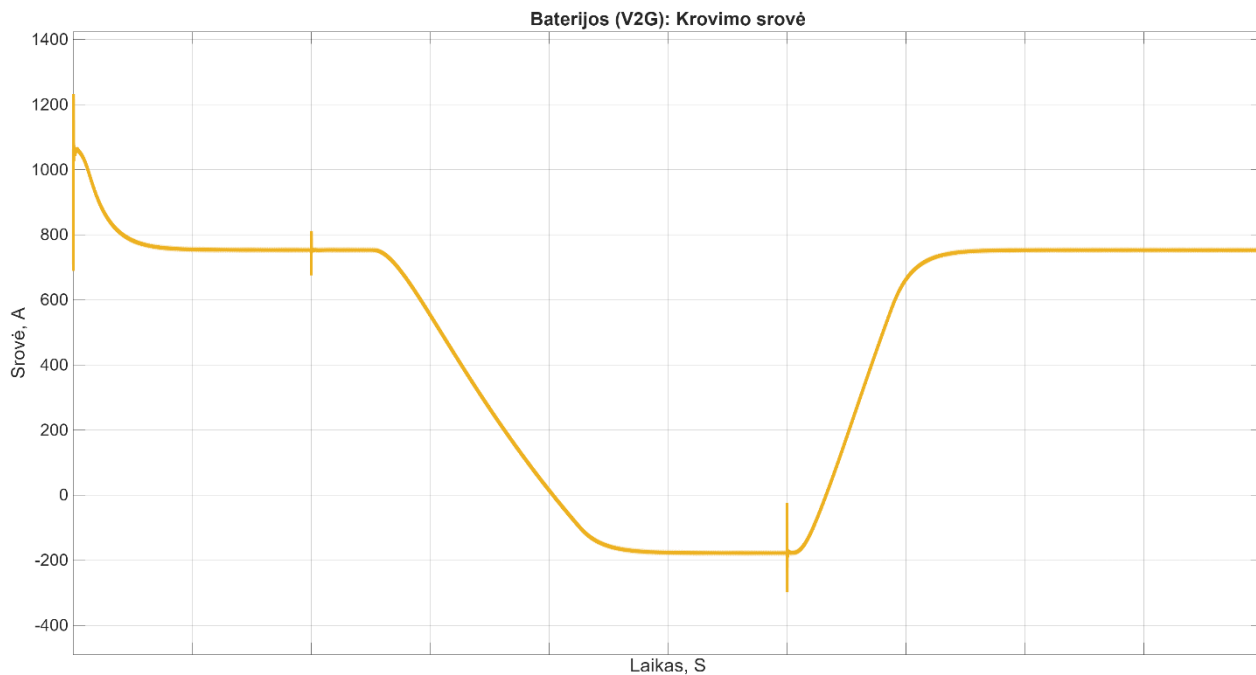
Stebint V2G baterijos duomenis grafike matoma, kad vidinė baterijos įtampa iki 1 MW apkrovos prijungimo siekė 464 V ir nukrito iki 446 V, tai rodo kad baterijos prarado savyje sukauptą energiją

ir ją atidavė. Kai yra atjungiamas 2 MW apkrova baterijos įtampa pradeda kilti iki kol pasiekia 464 V, baterija vėl įkraunama.



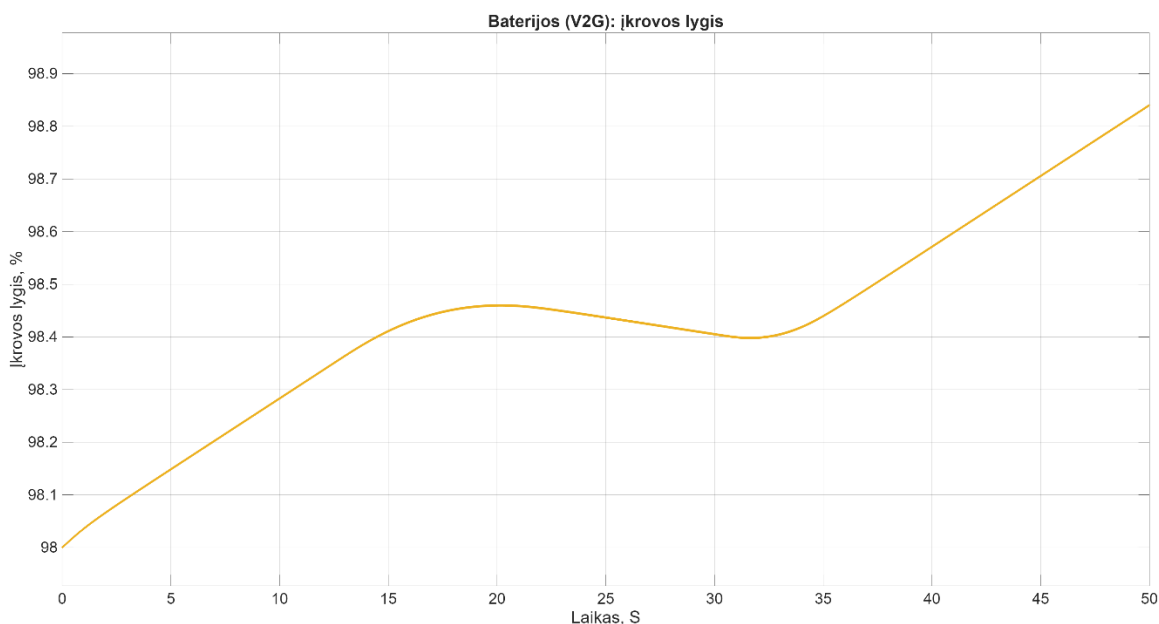
19 pav. V2G baterijos įtampa su 5 V2G EA

Stebint baterijos srovę galima matyti, kad prieš 1 MW apkrovos atjungimą ji yra 756 A – baterija yra kraunama, o po 1 MW apkrovos atjungimo srovė nukrenta iki -173 A – baterija yra iškraunama, taip bandydama atstatyti dažnį. Atjungus 2 MW apkrovą baterijos srovė vėl didėja kol pasiekia 757 A, tai parodo grįžimą į krovimo režimą.



20 pav. V2G baterijos srovė su 5 V2G EA

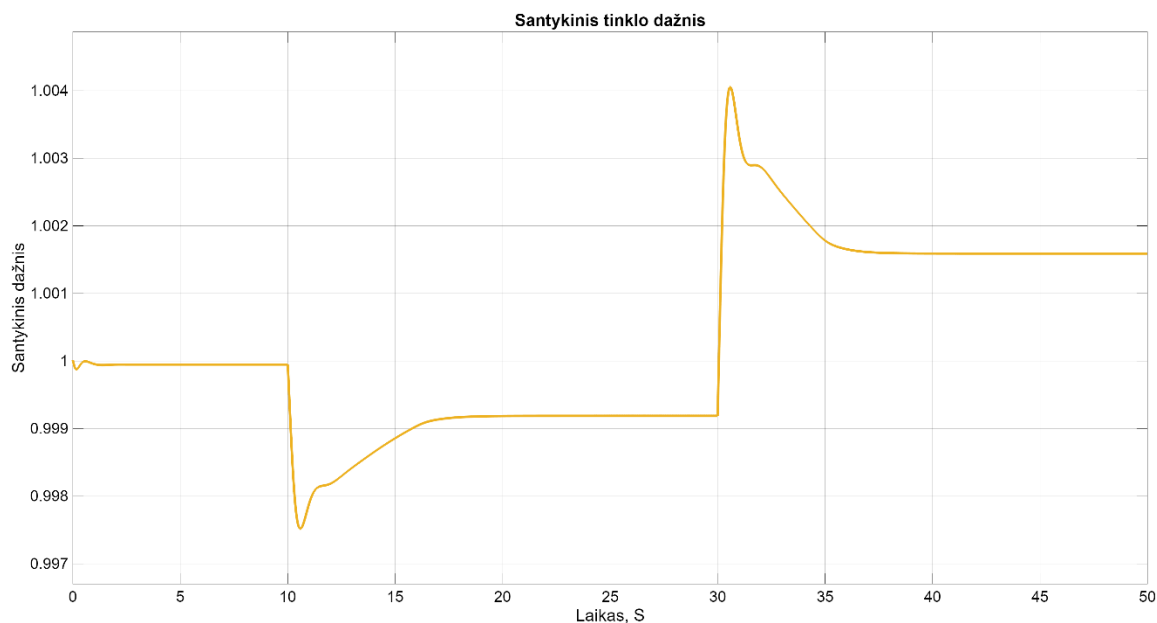
V2G baterijos įkrovos lygis yra pradamas simuliuoti nuo 98 %, baterija yra iš lėto kraunama iki kol ji pradeda atiduoti energiją į tinklą, prieš atidavimą ji pasiekia 98,46 %. Atiduodant energiją ji praranda savo įkrovą ir ji sumažėja iki 98,40 %. Vėl pradėjus krauti ji kraunasi iki kol simuliacijos galia jos įkrovos lygis siekia 98,84 %.



21 pav. V2G baterijos įkrovos lygis su 13 MW apkrova ir 5 V2G EA

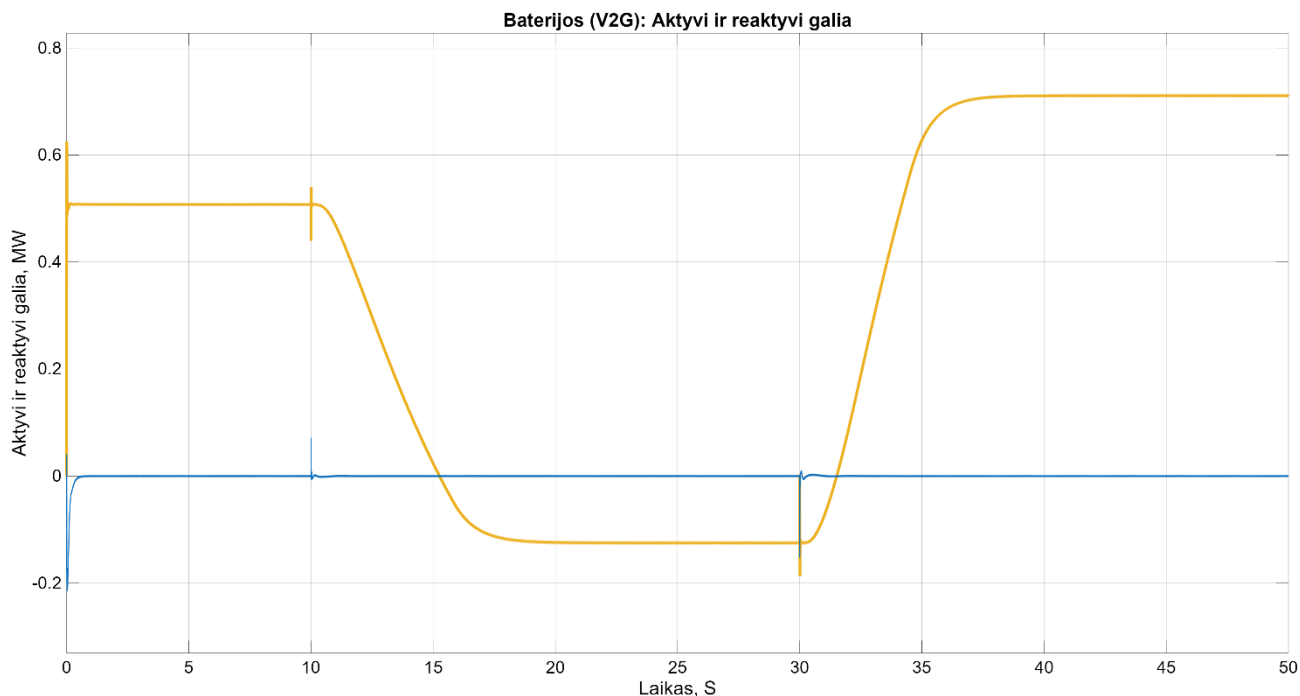
### 3.3. Simuliacija su 13 MW pastovia apkrova ir 10 V2G elektromobiliu:

Su 10 V2G tipo elektromobilių kartojama simuliacija. Iš grafiko matoma, kad simuliacijos pradžioje tinklo dažnis nusistovi per 1,7 sekundės ir siekia 0,9999 s.v. Po 1 MW apkrovos prijungimo tinklo santykinis dažnis nukrito iki 0,9975 ir per 8,9 sekundės stabilizavosi pasiekęs 0,9992 santykinį dažnį. Atjungus 2 MW apkrovą nuo tinklo santykinis dažnis pakilo iki 1,0045 s.v. ir stabilizavosi po 7,3 sekundžių pasiekdamas 1,0016.



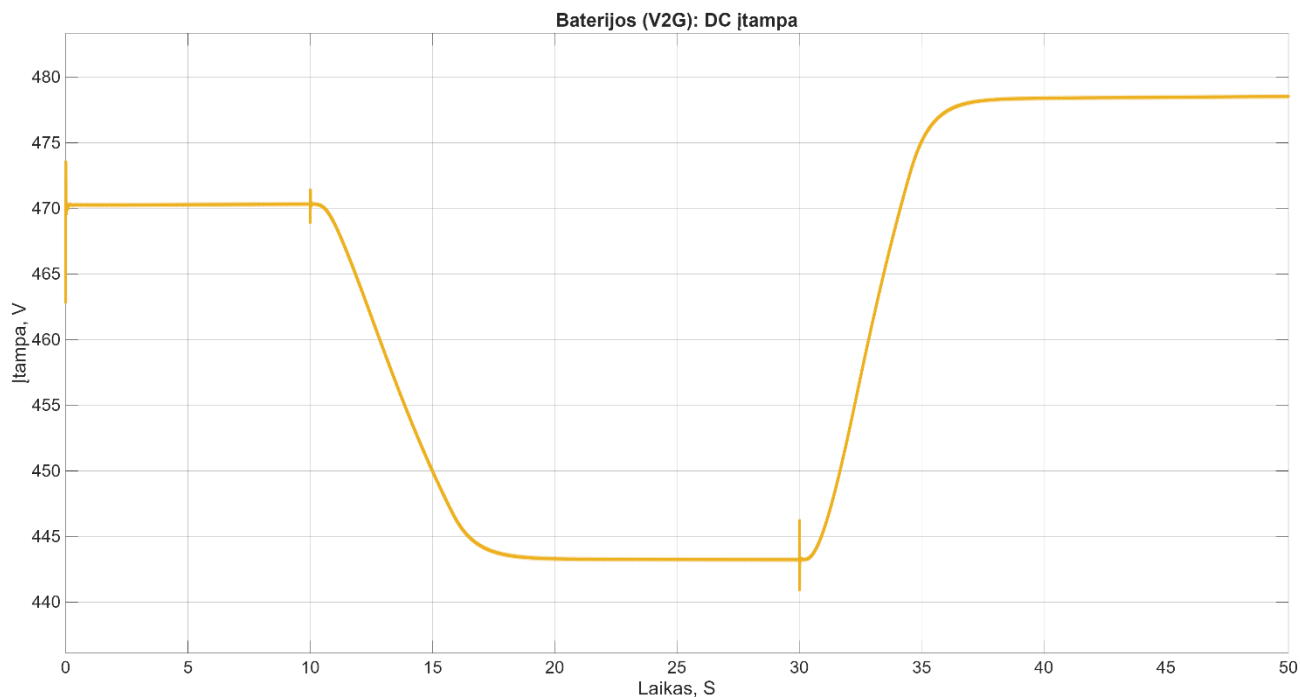
22 pav. Santykinis tinklo dažnio grafikas su 10 V2G EA

Stebint V2G baterijos aktyviają galią matoma, kad prieš 1 MW apkrovos ji siekia 0,507 MW, o po šios apkrovos prijungimo nukrenta iki -0,124 MW. Ši vertė laikosi iki 2 MW apkrovos prijungimo ir po jos pakyla iki 0,710 MW. Matoma kad pakitus tinklo apkrovai elektromobiliai bando kompensuoti tinklo nuokrypį. Tyrimo metu pastebėta, kad FCR tiekimo paslauga suveikia greičiau nei su 5 V2G elektromobiliais.



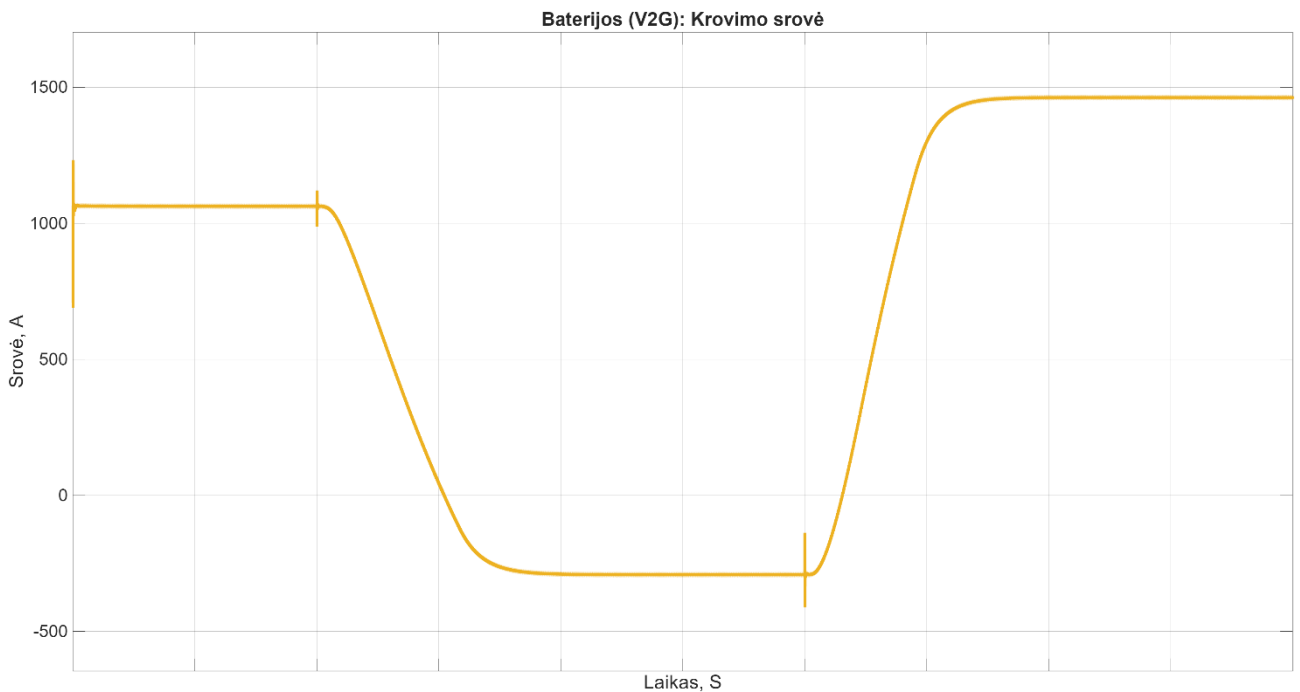
23 pav. V2G baterijos galia su 10 V2G EA

V2G baterijos grafike matoma, kad iki 1 MW apkrovos prijungimo elektromobilio baterijos įtampa siekia 470 V, o prijungus 1 MW apkrovą nukrenta iki 443 V. Ši įtampa išlieka panaši iki kol yra atjungiamas 2 MW apkrova ir baterijos įtampa pakyla iki 479 V.



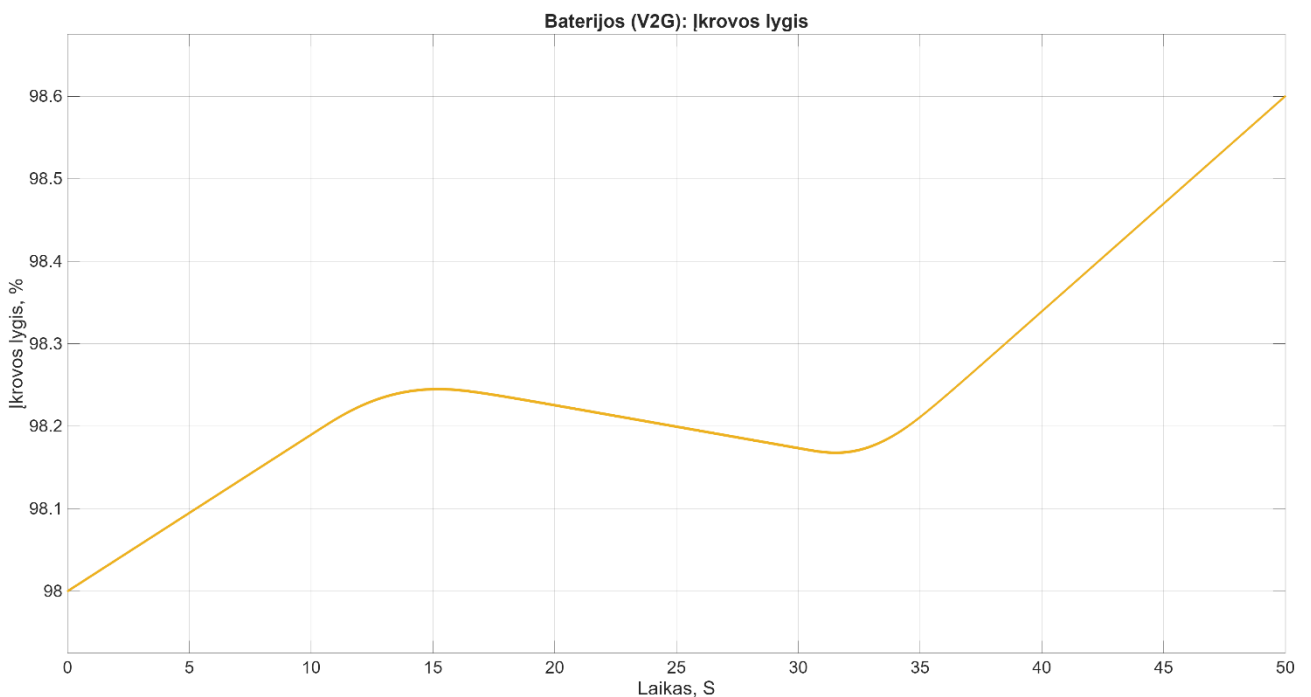
24 pav. V2G baterijos įtampa su 10 V2G EA

V2G srovės grafikas artimai atkartoja įtampos grafiką. Prieš 1 MW apkrovos prijungimą bateriją yra įkraunama 1064 A srove, o po apkrovos prijungimo ši srovė nukrenta iki -286 A srovės, tai parodo kad elektromobiliai pradėjo išsikrauti. Po 2 MW apkrovos atjungimo elektromobiliai pradeda krautis ir pasiekia 1464 A srovę.



**25 pav.** V2G baterijos srovė su 10 V2G EA

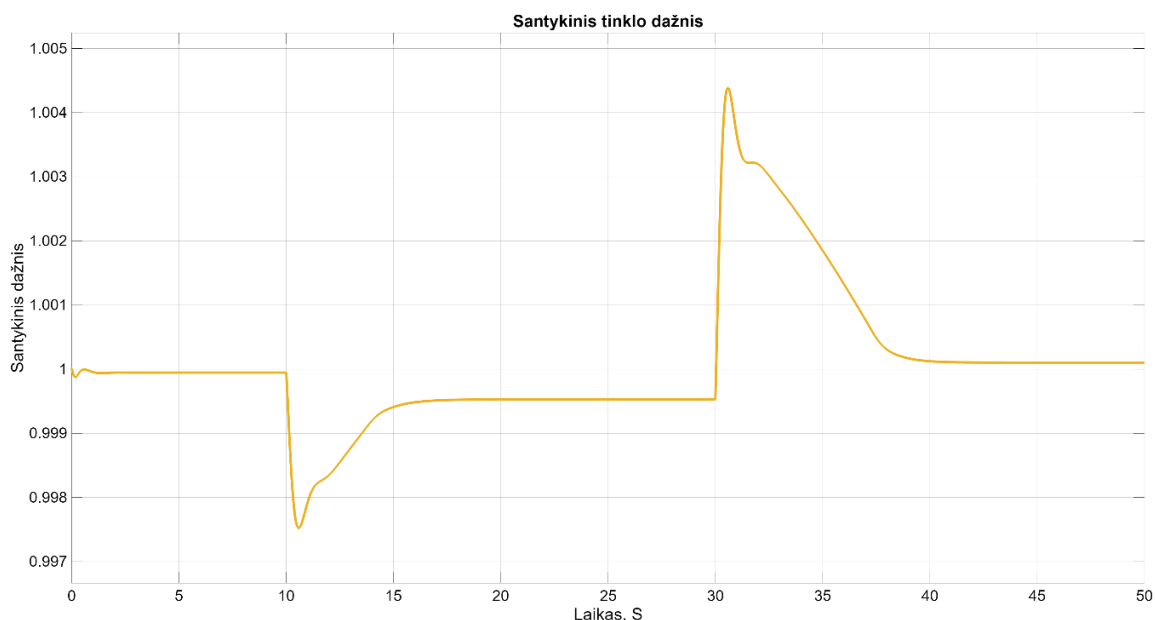
Nuo simuliacijos pradžios iki apkrovos atjungimo elektromobiliai spėja pasikrauti iki 98,25 % įkrovos lygio, o pradėjus kompensuoti dažnio nuokrypį išsikrauna iki 98,17 %. Atjungus 2 MW apkrovą elektromobiliai vėl pereina į krovimą režimą ir iki simuliacijos galo pasikrauna iki 98,60 %.



**26 pav.** V2G baterijos įkrovos lygis su 13 MW apkrova ir 10 V2G EA

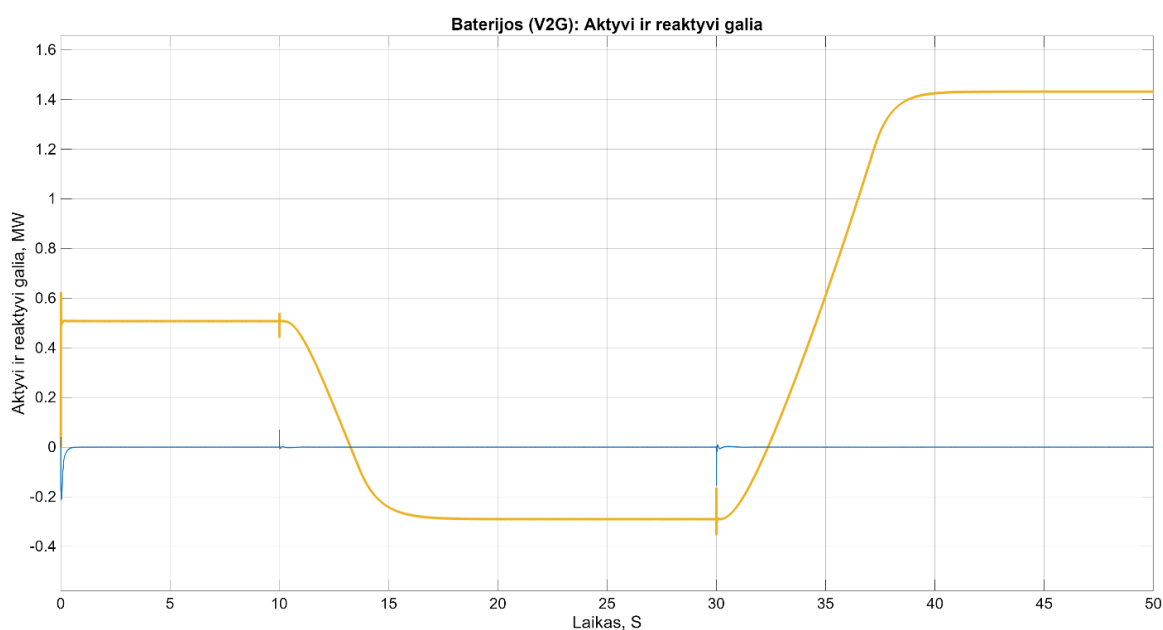
### 3.4. Simuliacija su 13 MW pastovia apkrova ir 20 V2G elektromobiliu:

Atlikus tyrimą su 20 V2G tipo elektromobilių. Iš pateikto grafiko matyti, kad tyrimo pradžioje tinklo dažnis stabilizavosi ir pasiekė 0,9999 santykinę reikšmę, tai truko 1,3 s. Prijungus 1 MW apkrovą, santykinis tinklo dažnis sumažėjo iki 0,9975 s.v., tačiau po 7,1 s nusistovėjo ties 0,9995 reikšme. Tuo tarpu atjungus 2 MW apkrovą, santykinis dažnis padidėjo iki 1,0004 ir po 11 s stabilizavosi ties 1,0001.



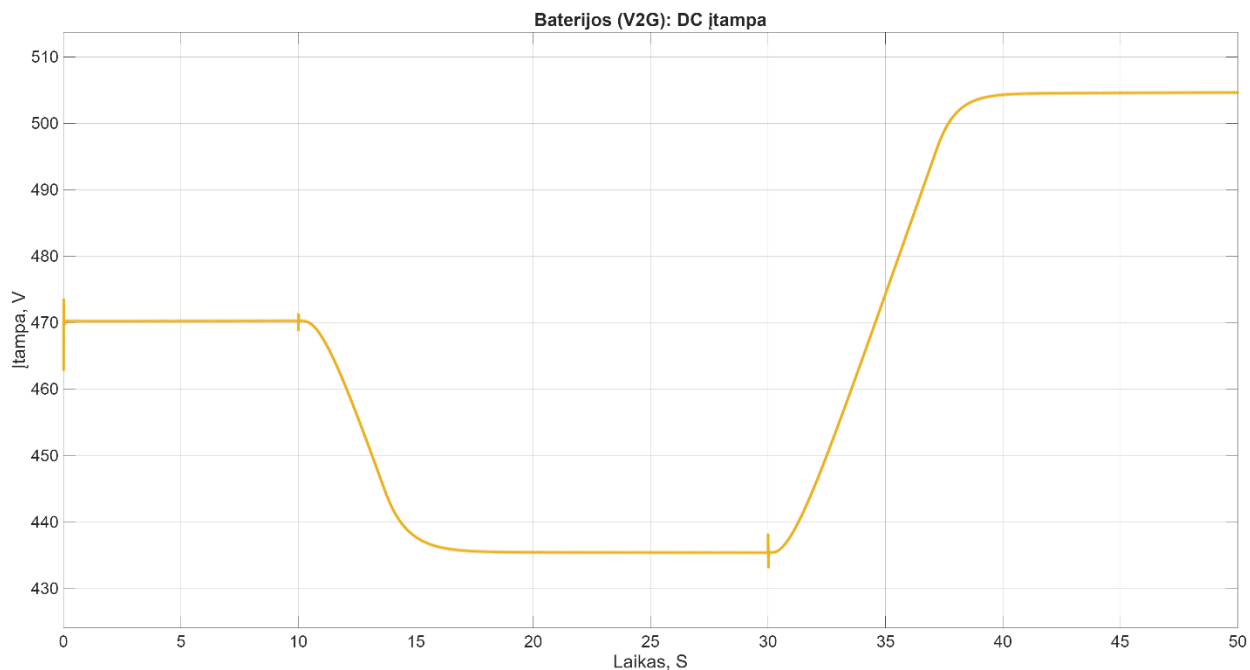
27 pav. Santykinis tinklo dažnio grafikas su 20 V2G EA

Analizuojant V2G baterijos aktyviają galią pastebima, kad prieš prijungiant 1 MW apkrovą, ji buvo lygi 0,507 MW. Prijungus šią apkrovą, galia sumažėjo iki -0,291 MW ir išliko tokio lygio iki 2 MW apkrovos pokyčio. Po 2 MW apkrovos prijungimo aktyvioji galia padidėjo iki 1,433 MW. Iš rezultatų matyti, kad keičiantis tinklo apkrovai, elektromobiliai reaguoja į dažnio nuokrypius ir siekia juos kompensuoti bei suveikia greičiau nei su mažesniais elektromobilių kiekiais.



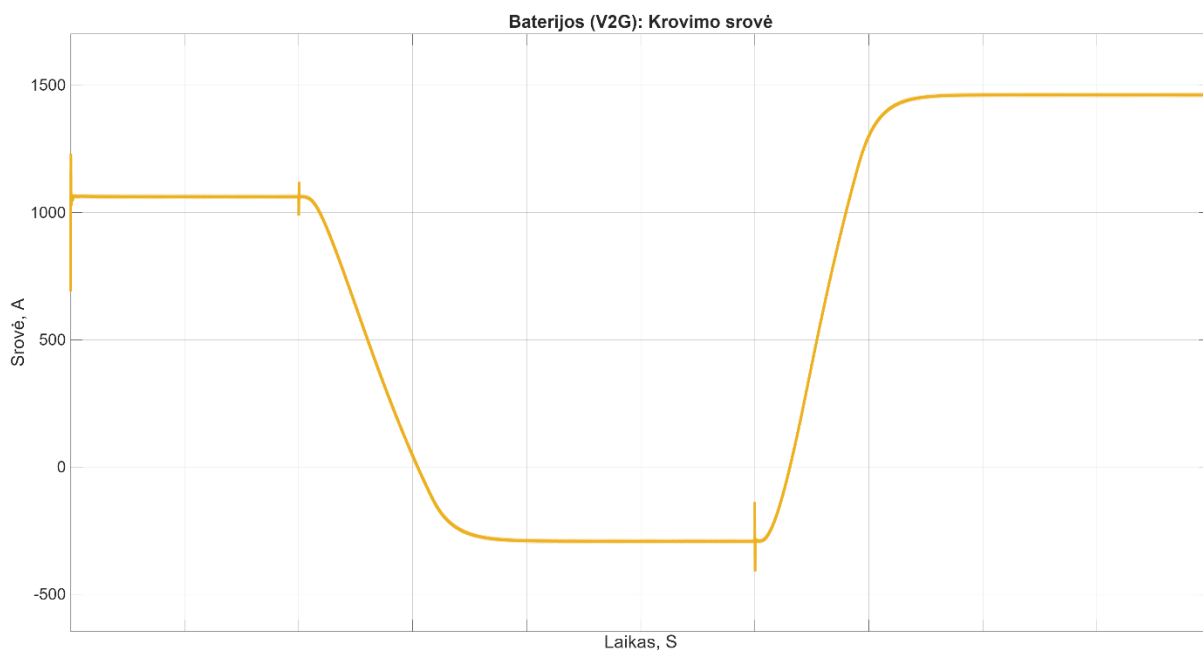
28 pav. V2G baterijos galia su 20 V2G EA

Analizuojant V2G baterijos duomenis grafike matyti, kad iki 1 MW apkrovos prijungimo vidinė baterijos įtampa buvo apie 470 V, tačiau prijungus apkrovą ji sumažėjo iki 435 V. Tai rodo, kad baterijos atidavė dalį sukauptos energijos tinklui. Atjungus 2 MW apkrovą, baterijos įtampa pradeda didėti ir galiausiai vėl pasiekia 504 V reikšmę, todėl galima teigti, kad baterija yra pakartotinai įkraunama.



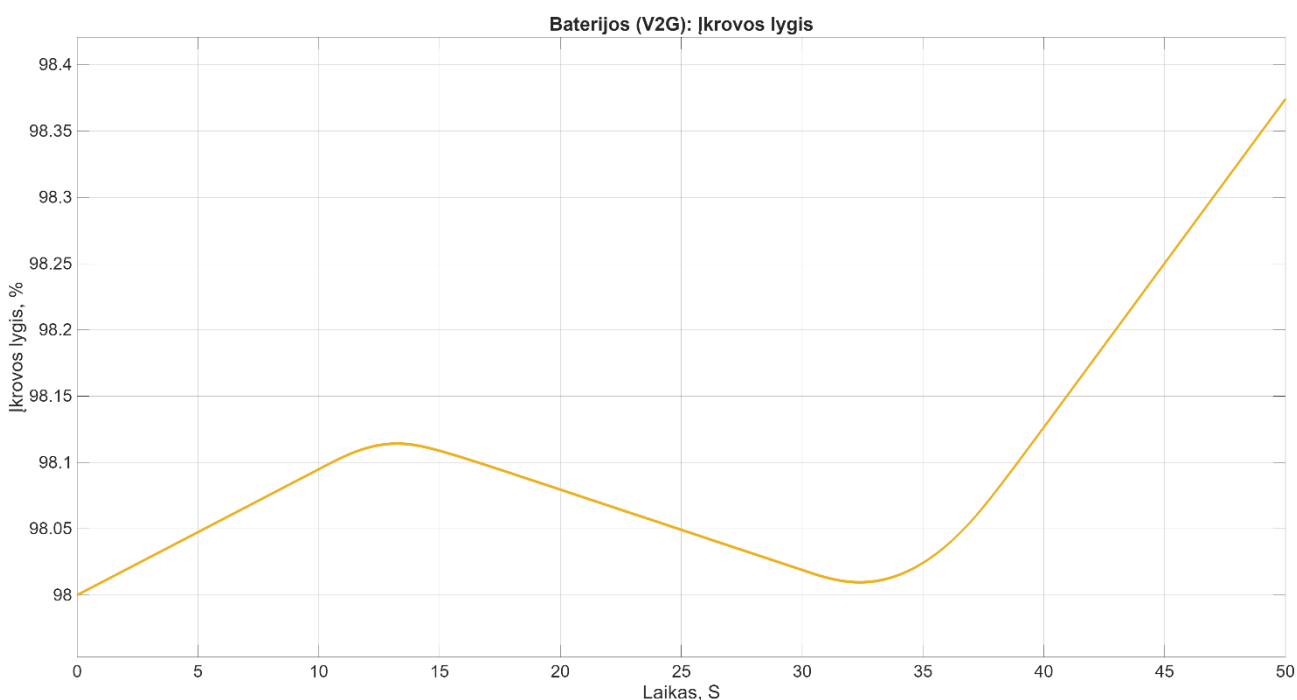
**29 pav.** V2G baterijos įtampa su 20 V2G EA

V2G srovės grafikas glaudžiai atitinka įtampos kitimo tendencijas. Iki 1 MW apkrovos prijungimo baterija buvo įkraunama 1061 A srove, tačiau prijungus apkrovą srovė sumažėjo iki -678 A, o tai rodo, kad elektromobiliai pradėjo atiduoti energiją tinklui ir išsikrauti. Atjungus 2 MW apkrovą, elektromobiliai vėl pradeda krauti, o įkrovimo srovė padidėja iki 2770 A.



**30 pav.** V2G baterijos srovė su 20 V2G EA

Nuo simuliacijos pradžios iki apkrovos atjungimo elektromobilių baterijų įkrovos lygis padidėja iki 98,11 %. Pradėjus kompensuoti tinklo dažnio nuokrypį, baterijos išsikrauna ir jų įkrovos lygis sumažėja iki 98,01 %. Atjungus 2 MW apkrovą, elektromobiliai vėl pereina į įkrovimo režimą, o simuliacijos pabaigoje jų įkrovos lygis pasiekia 98,37 %.



31 pav. V2G baterijos įkrovos lygis su 13 MW apkrova ir 20 V2G EA

### 3.5. Simuliuotų duomenų palyginimas

Iš atlikto tyrimo buvo išrinkti duomenys ir sudėti į lenteles. Sudarytos trys lentelės, vienoje yra lyginamas tinklo santykinis dažnis, kaip jis buvo įtakotas kintančio elektromobilių kiekio. Antroje stebima kiek laiko užtruko stabilizuotis tinklui po 1 MW apkrovos prijungimo ir po 2 MW apkrovos atjungimo. Trečiojoje lentelėje bus matoma kaip kito baterijos įkrovos lyginant su apkrovų prijungimu ir atjungimu.

#### 3.5.1. Santykinio tinklo dažnio palyginimas

3 lentelė. Tinklo santykinis dažnis priklausomai nuo elektromobilių kiekio

V2G elektromobilių kiekis	1 EA	5 EA	10 EA	20 EA
Dažnis prieš apkrovą	1,0009	1,0003	0,9999	0,9999
Dažnis po 1 MW apkrovos prijungimo	0,9984	0,9988	0,9975	0,9975
Stabilizuotas dažnis po 1 MW apkrovos	0,9988	0,9991	0,9992	0,9995
Dažnis po 2 MW apkrovos atjungimo	1,0037	1,0034	1,0045	1,0004
Stabilizuotas dažnis po 2 MW apkrovos atjungimo	1,0029	1,0023	1,0016	1,0001

Iš gautų duomenų galima pastebėti, kad prasidėjus tyrimui arčiausiai nominalaus dažnio nusistovi tinklas kuriame yra didžiausias kiekis V2G tipo elektromobilių. Taip nutinka dėl pradžioje vykstančių pereinamųjų procesų, kuriems vykstant trumpam įsijungia elektromobilių balansavimas ir padeda jam nusistovėti arčiau nominalios vertės.

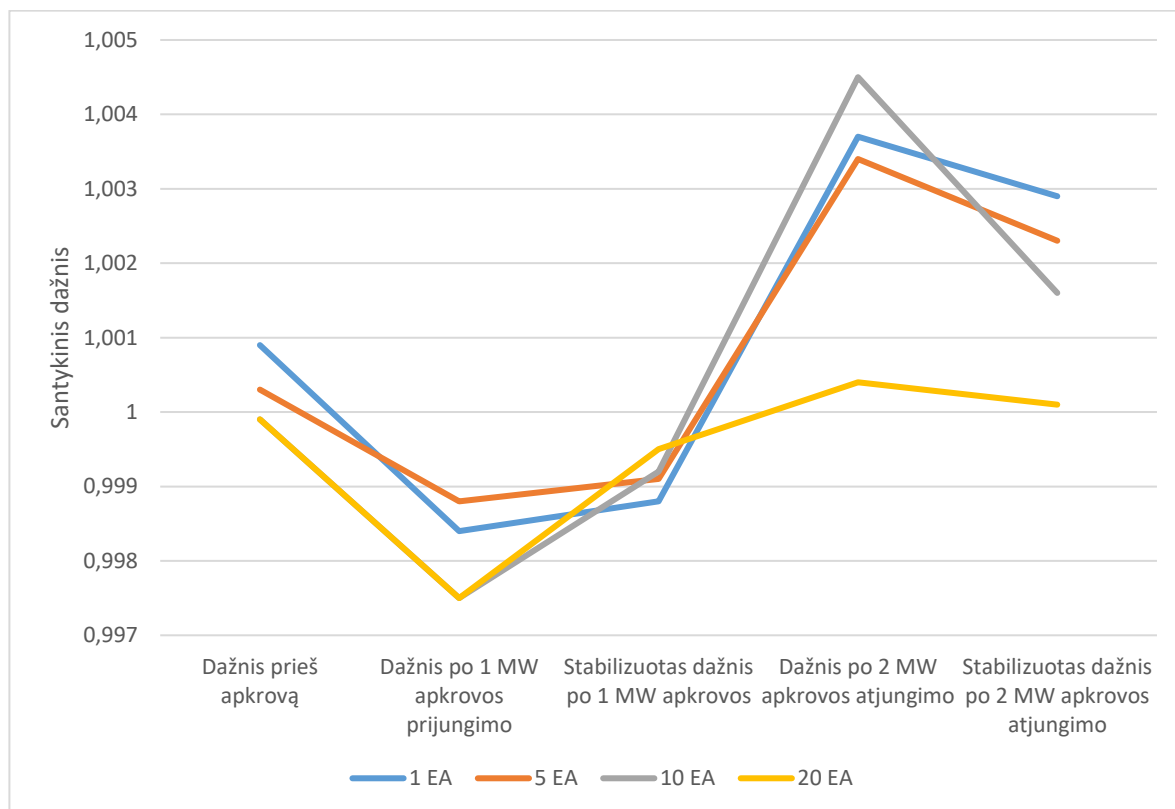
Po 1 MW apkrovos prijungimo matoma, kad kai tinkle buvo 1 V2G elektromobilis, dažnis buvo nukrypęs iki 0,9984, o su 5 elektromobiliais tinklo dažnio nuokrypis pagerėjo iki 0,9988, tačiau, padidinus V2G elektromobilių kiekį iki 10 ir 20 tinklo dažnio nuokrypis išaugo iki 0,9975. Šis nuokrypis gali atsirasti nuo daugiau tinkle esančių elektromobilių ir kol jie visi bendrai pradeda atlikinėti tinklo dažnio stabilizavimą, šis dažnio nuokrypis įvyksta dėl didesnio vartotojų kiekio.

Po šio dažnio šuolio po apkrovos prijungimo galima matyti, kad didesnis elektromobilių kiekis tinkle lėmė, kad kai dažnis stabilizavosi jis stabilizavosi arčiau nominalios tinklo dažnio ribos, stabilizuotas tinklo dažnis pagerėjo nuo 0,9988 iki 0,9995, tai yra 0,0007 pagerėjimas.

Priešingai nuo 1 MW apkrovos prijungimo, kai buvo atjungta 2 MW apkrovai tinklo dažnio nuokrypis sumažėjo didinant elektromobilių kiekį tinkle. Tačiau kai tinkle buvo 10 elektromobilių tinklo nuokrypis išaugo iki 1,0045, o kai tinkle atsirado 20 V2G elektromobilių nuokrypis sumažėjo iki 1,0004. Lyginant tinklą su 1 ir 20 V2G elektromobilių galima matyti, kad tinklo dažnis pagerėjo per 0,0033. Tai gali lemti, kad elektromobiliai yra grįžę į krovimo režimą ir lengviau sugeria padidėjusią energijos kiekį -tai daro padidindami savo krovimo galią.

Stabilizavus tinklui, matomas santykinio dažnio pagerėjimas didinant elektromobilių kiekį. Tinklas su 1 V2G stabilizavosi ties 1,0029 santykiniu dažniu, o kai buvo didinamas elektromobilių kiekis šis dažnis mažėjo ir esant 20 V2G elektromobilių tinkle pasiekė santykinę 1,0001 dažnį, kas yra beveik nominalus tinklo dažnis.

Nors su 20 V2G elektromobilių matomas didesnis nuokrypis po 1 MW apkrovos, tačiau bendras tinklo stabilumas yra didesnis, tai rodo, kad V2G elektromobilių didinimas padeda bendram tinklo stabilumui.



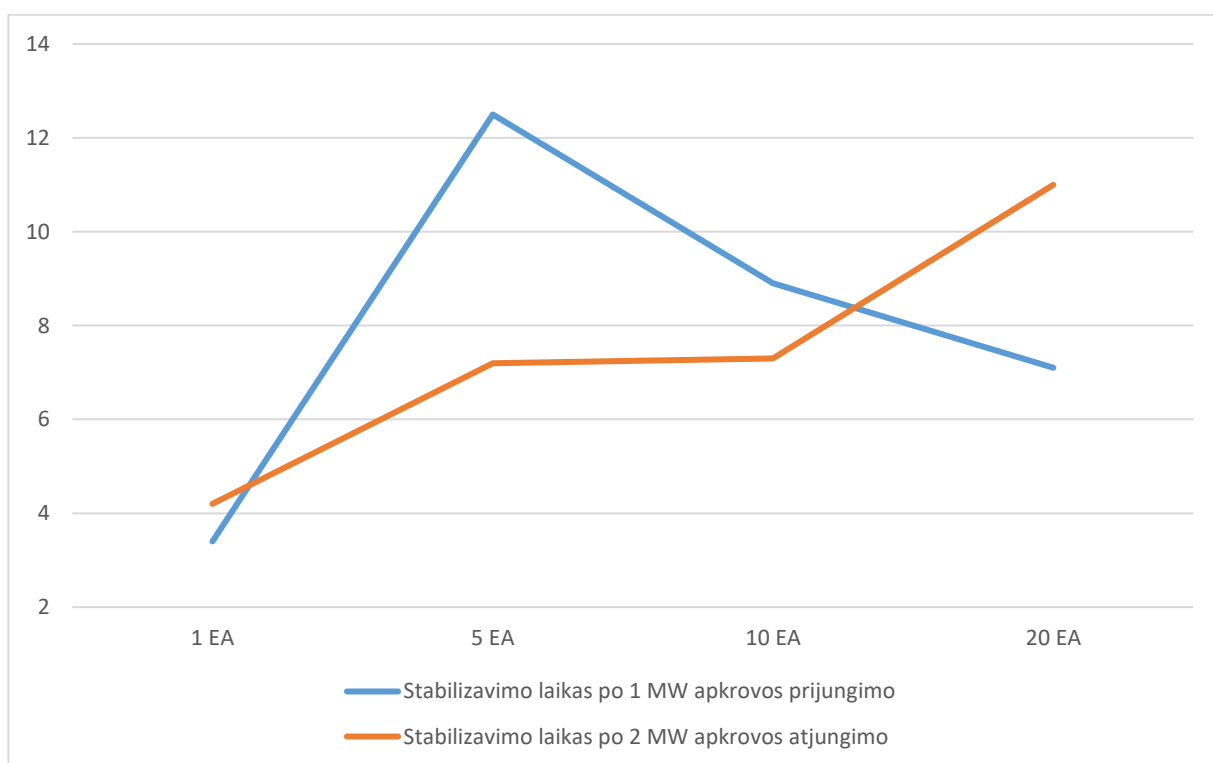
**32 pav.** Santykinio tinklo dažnio palyginimas su skirtingais V2G elektromobilių kiekiais

### 3.5.2. Sistemos stabilizavimosi laikas

4 lentelė. Tinklo stabilizavimosi laikas priklausomai nuo elektromobilių kiekio sekundėmis

V2G elektromobilių kiekis	1 EA	5 EA	10 EA	20 EA
Stabilizavimo laikas po 1 MW apkrovos prijungimo, S	3,4	12,5	8,9	7,1
Stabilizavimo laikas po 2 MW apkrovos atjungimo, S	4,2	7,2	7,3	11

Stebint duomenis per kiek laiko tinklas stabilizuojasi po 1 MW apkrovos prijungimo ir 2 MW atjungimo galima pastebėti, kad tinklas greičiausiai stabilizavosi kai tinkle nedalyvavo elektromobiliai (buvo prijungtas 1 V2G elektromobilis dėl simuliacijos negalėjimo apdoroti nullo elektromobilių). Taip yra tikėtina, kadangi tinkle yra mažiau apkrovos dėl nesikraunančių elektromobilių ir šis poveikis galėtų skirtis jei tinkle būtų daugiau nei vienas generuojantis šaltinis, neskaičiuojant elektromobilių. Tačiau, didinant elektromobilių kiekį galima pastebėti, kad po 1 MW apkrovos prijungimo tinklas stabilizuojasi greičiau, bet vyksta atvirkštinis procesas kai yra atjungiamas 2 MW apkrova, didinat elektromobilių kiekį tinkle stabilizavimosi laikas ilgėja.



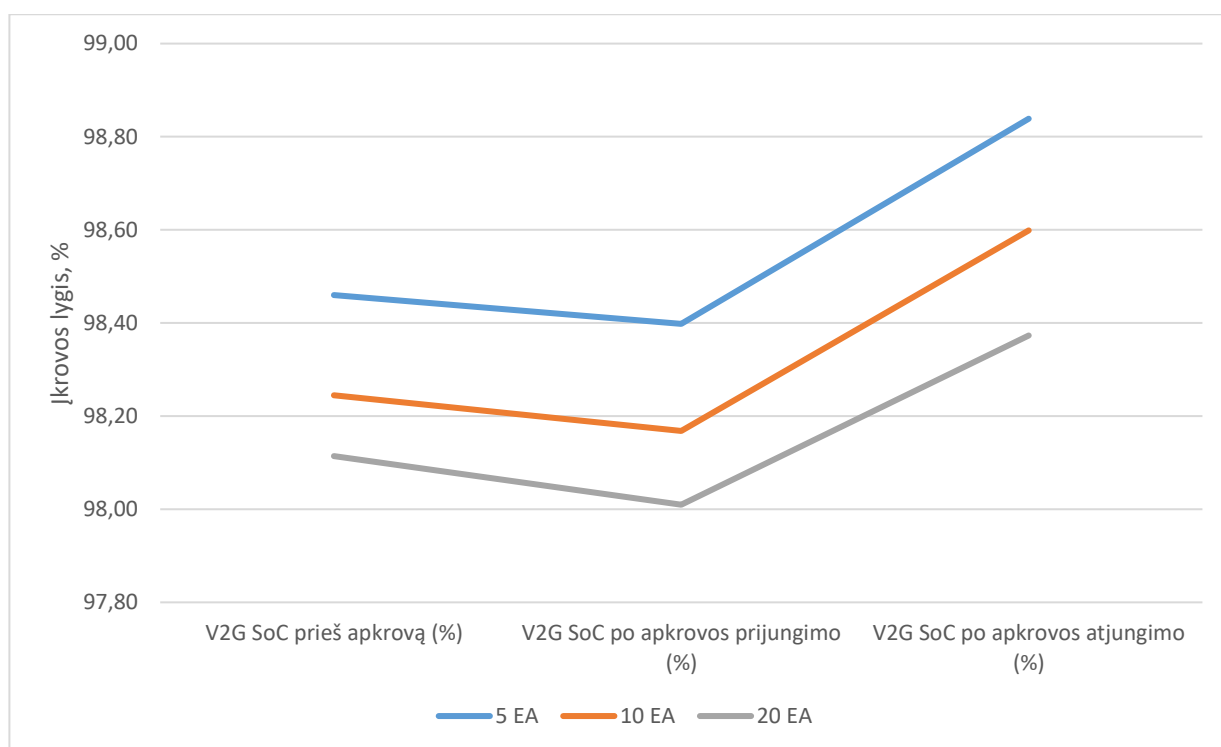
33 pav. Tinklo stabilizavimosi laikas priklausomai nuo elektromobilių

### 3.5.3. Baterijų įkrovos lygis

5 lentelė. Baterijos įkrovos lygis priklausomai nuo apkrovų būsenos

V2G elektromobilių kiekis	1 EA	5 EA	10 EA	20 EA
V2G SoC prieš apkrovą (%)	–	98,46 %	98,24 %	98,11 %
V2G SoC po apkrovos prijungimo (%)	–	98,40 %	98,17 %	98,01 %
V2G SoC po apkrovos atjungimo (%)	–	98,84 %	98,60 %	98,37 %

Iš baterijos duomenų matoma, kad kuo daugiau elektromobilių yra naudojama tinklo balansavimui tuo yra didesnės galimybės paimti didesnį energijos kiekį iš elektromobilių baterijų, kuris būtų panaudotas balansavimui kai yra prijungiamos apkrovos. O kai apkrova yra atjungiamą yra didesnis energijos kiekis kurį galima priimti.



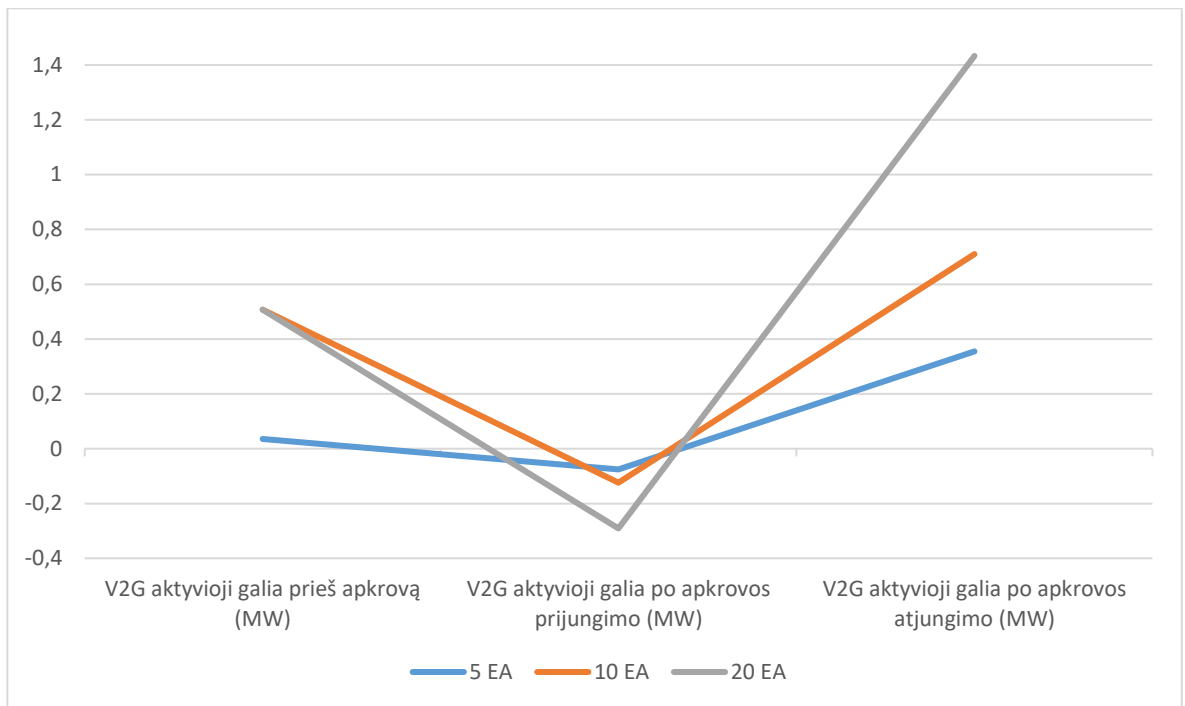
34 pav. V2G įkrovos lygis priklausomai nuo apkrovos būsenos

### 3.5.4. Elektromobilių galia

6 lentelė. Elektromobilių galia

V2G elektromobilių kiekis	1 EA	5 EA	10 EA	20 EA
V2G aktyvioji galia prieš apkrovą (MW)	–	0,0354	0,507	0,507
V2G aktyvioji galia po apkrovos prijungimo (MW)	–	-0,0756	-0,124	-0,291
V2G aktyvioji galia po apkrovos atjungimo (MW)	–	0,355	0,71	1,433

Atlikus tyrimą iš duomenų galima matyti, kad su 5 V2G elektromobiliais yra mažiausias potencialas gauti ir atiduoti energiją su didele galia. Didinant elektromobilių kiekį tinkle padidėja galimybės atiduoti arba priimti elektrą pasinaudojant didesne galia. Taip pat matoma, kad kai sistemoje yra 10 arba 20 elektromobilių prieš apkrovų prijungimą ir atjungimą jie kraunasi beveik identiška galia, tačiau kai į tinklą atiduodamas didesnis kiekis energijos atidavimo galia padvigubėja. Su 5 V2G EA yra atiduodama tiktais -0,0756 MW, o su 20 V2G EA atidavimo galia padidėja iki -0,291 MW. Po 2 MW apkrovos atjungimo tinkle su 20 V2G EA, elektros energija sugerama 1,433 MW, o tinkle su 10 V2G EA 0,71MW, tai yra per pus mažiau, tokia pati tendencija yra tarp 10 ir 5 V2G elektromobilius turinčių tinklų. Dėl didesnės elektromobilių krovimosi galios matoma, kad tinklo stabilizavimui, kai reikia sugerti energiją, užtenka mažiau elektromobilių. Tačiau norint ją atiduoti reikia daug didesnio kiekio elektromobilių. Šis skirtumas susidaro dėl 15 kW atidavimo apribojimo, nors krovimas gali būti vykdomas iki 75 kW.



**35 pav. Elektromobilių atidavimo ir krovimo galia**

## Išvados

1. Nustatyta, kad V2G technologija gali būti naudojama sisteminių paslaugų rinkoje elektros tinklo dažnio reguliavimui, piko apkrovų mažinimui bei atsinaujinančių energijos šaltinių integracijai. Elektromobilių baterijos gali veikti kaip decentralizuotas energijos kaupimo rezervas, galintis greitai reaguoti į tinklo apkrovų pokyčius. Taip pat nustatyta, kad dažnio reguliavimo paslaugose svarbiausi rezervų tipai yra FCR, aFRR ir mFRR, kurių veikimo laikai svyruoja nuo kelių sekundžių iki keliolikos minučių.
2. Ištirtas ir *Matlab Simulink* aplinkoje pritaikytas modelis „Microgrid with Electric Vehicles V2G (Vehicle-to-Grid) Support“. Modelis pasirinktas dėl jame esančio sinchroninio generatoriaus ir V2G tipo baterijos reikalingos atlikti tyrimą. Modelis pritaikytas Lietuvos elektros tinklo parametrams: tinklo dažnis pakeistas iš 60 Hz į 50 Hz, generatoriaus įtampa – iš 13,8 kV į 14 kV, o transformatoriaus žemosios įtampos pusė – iš 208 V į 230 V. Simuliacijoje naudota 25 MVA generatoriaus galia, 70 kWh elektromobilio baterijos talpa bei 50 sekundžių modeliavimo laikotarpis. Modelyje taikyta 13 MW pastovi apkrova, papildomai po 10 sekundžių prijungiant 1 MW apkrovą ir po 30 sekundžių atjungiant 2 MW apkrovą.
3. Atlikus FCR dažnio palaikymo rezervo simuliacijos su 1, 5, 10 ir 20 V2G elektromobilių nustatyta, kad didėjant elektromobilių kiekiui mažėja tinklo dažnio galutiniai nuokrypiai ir trumpėja sistemos stabilizavimosi laikas po 1 MW apkrovos prijungimo, o po 2 MW atjungimo ilgėja. Didėjant elektromobilių kiekiui tinklo dažnio svyravimai mažėja, baterijos aktyviai tiekė arba vartojo energiją priklausomai nuo apkrovos pokyčių. Nustatyta, kad didesnis elektromobilių kiekis tinkle padeda reguliuoti apkrovą.
4. Atlikus simuliuotų duomenų analizę nustatyta, kad V2G technologija teigiamai veikia tinklo stabilumą ir gali būti naudojama FCR dažnio reguliavimo sisteminiams paslaugoms. Didėjant elektromobilių kiekiui trumpėjo tinklo stabilizavimosi laikas kai buvo prijungiama 1 MW apkrova nuo 12,5 sekundžių iki 7 sekundės, nors ir ilgėdavo atjungus 2 MW apkrovą nuo 7,2 sekundžių iki 11 sekundžių bei mažėjo galutiniai dažnio nuokrypiai po apkrovų pokyčių, išskyrus po 1 MW apkrovos. Visais atvejais galutinis tinklo dažnis grįžo arčiau nominalaus dažnio. Taip pat didinant elektromobilių kiekį jų prieinama atidavimo ir gavimo galia didėjo.

## Literatūros sąrašas

1. *Vehicle-to-Grid (V2G): Everything You Need to Know*. [žiūrėta 2025-06-02]. Prieiga per internetą:<https://www.virta.global/vehicle-to-grid-v2g>.
2. V2G: What You Need to Know about Vehicle-to-Grid in 2025! | Go-E [žiūrėta 2025-06-04].
3. AZIZ, M., et al. Utilization of Electric Vehicles and their used Batteries for Peak-Load Shifting. *Energies*, /5, 2015, vol. 8, no. 5 [žiūrėta 2025-06-04]. pp. 3720–3738. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/3720> ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en8053720.
4. How V2G Can Help Stabilize the Electric Grids? & Transform Energy Management - YoCharge. -09-11, 2024 [žiūrėta 2025-06-04]. Prieiga per internetą: <https://yocharge.com/blog/how-v2g-can-help-stabilize-the-electric-grids/>.
5. JAMAN, S., et al. Distributed V2G-Enabled Multiport DC Charging System with Hierarchical Charging Management Strategy. *World Electric Vehicle Journal*, /4, 2026, vol. 17, no. 4 [žiūrėta 2026-05-03]. pp. 199. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2032-6653/17/4/199> ISSN 2032-6653. DOI 10.3390/wevj17040199.
6. Jason Svarc. Bidirectional EV Chargers Review - V2G & V2H, 25 JUNE, 2025. Prieiga per internetą: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/bidirectional-ev-chargers-review>.
7. SIGENERGY. *Sigenenergy SigenStor DC Bi-Directional EV Charging Module*. Prieiga per internetą:<https://buzz.energy/products/sigen-dc-ev-charging-module>.
8. What types of electric vehicles are compatible with Vehicle-to-Grid technology?. -12-16, 2023 [žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą: <https://www.electronicofficesystems.com/2023/12/16/what-types-of-electric-vehicles-are-compatible-with-vehicle-to-grid-technology/>.
9. *V2G Explained - Benefits of Vehicle-to-Grid Technology*. [žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą:<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/v2g-explained-vehicle-to-grid-benefits>.
10. *Bidirectional Charging and Electric Vehicles for Mobile Storage*. [žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą:<https://www.energy.gov/femp/bidirectional-charging-and-electric-vehicles-mobile-storage>.
11. *Unlocking the Full Potential of EVs with Vehicle-to-Grid Technology*. [žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą:<https://www.spirii.com/en/press-releases/unlocking-the-full-potential-of-evs-with-vehicle-to-grid-technology>.
12. How does the front-end protocol support V2G charging?. -03-08, 2024 [žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą: <https://www.evengineeringonline.com/how-does-front-end-protocol-support-v2g-charging/>.
13. What is the back-end protocol in a vehicle-to-grid (V2G) EV ecosystem?. -06-03, 2024 [žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą: <https://www.evengineeringonline.com/what-is-the-back-end-protocol-in-a-vehicle-to-grid-v2g-ev-ecosystem/>.
14. How Does V2G Impact Battery Lifespan? Question [žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą: <https://energy.sustainability-directory.com/question/how-does-v2g-impact-battery-lifespan/>.

15. MOHAMMADI, F. and MIRHASHEMI, M. *An Overview of Ancillary Services Provided by Vehicle-to-Grid Systems*. , 2024-11 [ žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10882738> DOI 10.1109/APET63768.2024.10882738.
16. *Ancillary Services*. [ žiūrėta 2025-06-08]. Prieiga per internetą: <https://www.aeso.ca/market/market-participation/ancillary-services>.
17. *Ancillary Services* [ žiūrėta 2025-06-09]. Prieiga per internetą: <https://www.ieso.ca/ancillary-services>.
18. *Vehicle-to-Grid (V2G)* [ žiūrėta 2025-06-09]. Prieiga per internetą: <https://www.enovates.com/v2g/>.
19. *Frequency Containment Reserve (FCR) Compensates for Fluctuations in the Electricity Grid within Seconds. Learn More about Primary Control in this Article*. [ žiūrėta 2025-06-17]. Prieiga per internetą: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/frequency-containment-reserve-fcr>.
20. Litgrid. *Dažnio Išlaikymo Rezervo Paslaugos Parengties Tvirtinimas*. Litgrid, -09-01, 2025.
21. *Automatic Frequency Restoration Reserve (aFRR)*. [ žiūrėta 2025-06-17]. Prieiga per internetą: <https://nanoenergies.eu/knowledge-base/automatic-frequency-restoration-reserve-afrr>.
22. *How does mFRR Works Worldwide? what is the Tertiary Reserve and Balancing Markets? Find all the Answers Here*. [ žiūrėta 2025-06-17]. Prieiga per internetą: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/mfrr>.
23. *V2G Economic Incentives* → Term. Aprli, 17, 2025 [ žiūrėta 2025-06-09]. Prieiga per internetą: <https://energy.sustainability-directory.com/term/v2g-economic-incentives/>.
24. *Vehicle to Grid Scheduling (V2G) - Valley Filling, Peak Load Shaving, Priority Charging Mode*. -08-16, 2023 [ žiūrėta 2025-06-09]. Prieiga per internetą: <https://simulationtutor.com/vehicle-to-grid-scheduling-v2g-valley-filling-peak-load-shaving-priority-charging-mode/>.
25. *Vehicle-to-Grid (V2G): Revolutionizing Energy and Transportation*. -03-02, 2024 [ žiūrėta 2025-06-09]. Prieiga per internetą: <https://taraenergy.com/blog/vehicle-to-grid-revolutionizing-energy-and-transportation/>.
26. *Reglamentas - 2016/631 - EN - EUR-Lex*. [ žiūrėta 2025-06-15]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:32016R0631>.
27. *How might Vehicle-to-Grid technology affect the lifespan of an EV's battery?*. -01-09, 2024 [ žiūrėta 2025-06-09]. Prieiga per internetą: <https://www.electronicofficesystems.com/2024/01/09/how-might-vehicle-to-grid-technology-affect-the-lifespan-of-an-evs-battery/>.
28. Ziga Mahkovec. *Analysis of Powerwall Battery Retention*, Mar 1, 2025 [ žiūrėta 2025-06-10]. Prieiga per internetą: <https://www.netzero.energy/content/2025-02/powerwall-analysis>.
29. Nigel. *Calendar Ageing Vs Chemistry*, May 14, 2025. Prieiga per internetą: <https://www.batterydesign.net/calendar-ageing-vs-chemistry/>.

30. UDDIN, K., DUBARRY, M. and GLICK, M.B. The Viability of Vehicle-to-Grid Operations from a Battery Technology and Policy Perspective. *Energy Policy*, 2018, vol. 113, no. C [ žiūrėta 2025-06-10]. pp. 342–347. Prieiga per internetą: <https://ideas.repec.org/a/eee/enepol/v113y2018icp342-347.html> DOI 10.1016/j.enpol.2017.11.015.
31. BU-808: How to Prolong Lithium-Based Batteries, 11-Oct, 2023. Prieiga per internetą: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>.
32. What Are The Impacts Of V2G On Battery Lifespan? → Question. 6 April, 2025 [ žiūrėta 2025-06-10]. Prieiga per internetą: <https://energy.sustainability-directory.com/question/what-are-the-impacts-of-v2g-on-battery-lifespan/>.
33. OLABI, A.G., et al. Battery Thermal Management Systems: Recent Progress and Challenges. *International Journal of Thermofluids*, 2022, vol. 15. pp. 100171. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202722000350> ISSN 2666-2027. DOI 10.1016/j.ijft.2022.100171.
34. KOECH, A.K., MWANDILA, G. and MULOLANI, F. A Review of Improvements on Electric Vehicle Battery. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 15. pp. e34806. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024108377> ISSN 2405-8440. DOI 10.1016/j.heliyon.2024.e34806.
35. *Stellantis and Factorial Energy Reach Key Milestone in Solid-State Battery Development*. [ žiūrėta 2025-06-10]. Prieiga per internetą: <https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2025/april/stellantis-and-factorial-energy-reach-key-milestone-in-solid-state-battery-development>.
36. KAKKAR, R., et al. A Review on Standardizing Electric Vehicles Community Charging Service Operator Infrastructure. *Applied Sciences*, /1, 2022, vol. 12, no. 23 [ žiūrėta 2025-06-10]. pp. 12096. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/23/12096> ISSN 2076-3417. DOI 10.3390/app122312096.
37. The road to V2G. -05-12, 2025 [ žiūrėta 2025-06-10]. Prieiga per internetą: <https://www.energymagazine.com.au/the-road-to-v2g/>.
38. Åsmund Møll Frengstad. *Guide: Here s what You Need to Know about Vehicle-to-Grid (V2G)*. [ žiūrėta 2025-06-10]. Prieiga per internetą: <https://www.current.eco/resources/articles/vehicle-to-grid-v2g>.
39. MEHDIZADEH, M., NORDFJAERN, T. and KLÖCKNER, C.A. Estimating Financial Compensation and Minimum Guaranteed Charge for Vehicle-to-Grid Technology. *Energy Policy*, 2023, vol. 180. pp. 113649. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523002343> ISSN 0301-4215. DOI 10.1016/j.enpol.2023.113649.
40. RAZZAQUE, M., et al. *Cybersecurity in Vehicle-to-Grid (V2G) Systems: A Systematic Review*. , -03-19, 2025 [ žiūrėta 2025-06-10]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/390038852\\_Cybersecurity\\_in\\_Vehicle-to-Grid\\_V2G\\_Systems\\_A\\_Systematic\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/390038852_Cybersecurity_in_Vehicle-to-Grid_V2G_Systems_A_Systematic_Review) DOI 10.48550/arXiv.2503.15730.
41. RATNAM, E.L., WELLER, S.R. and KELLETT, C.M. An Optimization-Based Approach to Scheduling Residential Battery Storage with Solar PV: Assessing Customer Benefit. *Renewable*

*Energy*, 2015, vol. 75. pp. 123–134. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114005588> ISSN 0960-1481. DOI 10.1016/j.renene.2014.09.008.

42. AL-AWAMI, A. and SORTOMME, E. Coordinating Vehicle-to-Grid Services with Energy Trading. *IEEE Trans.Smart Grid*, 2012, vol. 3. pp. 453–462 DOI 10.1109/TSG.2011.2167992.

43. TREMBLAY, O. and DESSAINT, L. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model. *World Electr Veh J*, 2009, vol. 3. pp. 1–10 DOI 10.3390/wevj3020289.

44. *RENAULT 5 – Visiškai Elektrinis Miesto Automobilis | Renault Lithuania*. [žiūrėta 2026-01-25]. Prieiga per internetą: <https://www.renault.lt/cars/renault5/overview.html>.

45. *Volkswagen ID.4*. Prieiga per internetą: <https://www.volkswagen.lt/lt/chose-your-volkswagen/models/ID4.html>.

46. „*LEAF*“ | *Šeimos Elektromobilis*. [žiūrėta 2026-01-25]. Prieiga per internetą: <https://www.nissan.lt/automobiliai/nauji-automobiliai/leaf.html>.

47. *Kia Ev9*. Prieiga per internetą: <https://www.kia.lt/models/mv>.

48. I. THE MATHWORKS. *Microgrid with Electric Vehicles V2G (Vehicle-to-Grid) Support*. Prieiga per internetą: <https://ch.mathworks.com/help/sps/ug/microgrid-with-electric-vehicles-v2g-support.html>.

49. *Power Sensor (Three-Phase)*. Prieiga per internetą: <https://ch.mathworks.com/help/sps/ref/powersensorthreephase.html>.

50. *Power Measurement (Three-Phase)*. Prieiga per internetą: <https://ch.mathworks.com/help/sps/ref/powermeasurementthreephase.html>.

51. *Average-Value Voltage Source Converter (Three-Phase)*. Prieiga per internetą: [https://ch.mathworks.com/help/sps/ref/averagevaluevoltageconverterthreephase.html?s\\_tid=srchtitle\\_support\\_results\\_1\\_Average-Value%2520Voltage%2520Source%2520Converter%2520%28Three-Phase%29](https://ch.mathworks.com/help/sps/ref/averagevaluevoltageconverterthreephase.html?s_tid=srchtitle_support_results_1_Average-Value%2520Voltage%2520Source%2520Converter%2520%28Three-Phase%29).

52. LAI, X., QIAO, D., ZHENG, Y. and ZHOU, L. A Fuzzy State-of-Charge Estimation Algorithm Combining Ampere-Hour and an Extended Kalman Filter for Li-Ion Batteries Based on Multi-Model Global Identification. *Applied Sciences*, /11, 2018, vol. 8, no. 11 [žiūrėta 2026-05-06]. pp. 2028. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/11/2028> ISSN 2076-3417. DOI 10.3390/app8112028.