

DOI: [10.46793/CIGRE37.C2.19](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C2.19)

C2.19

ПРОВЕРА ИСПУЊЕНОСТИ ЗАХТЕВА $U-Q/P_{max}$ И $P-Q/P_{max}$ ИЗ ПРАВИЛА ЗА ПРИКЉУЧЕЊЕ ОБЈЕКТА НА ПРЕНОСНИ СИСТЕМ У ПРОЦЕСУ ПРИКЉУЧЕЊА МОДУЛА ЕНЕРГЕТСКОГ ПАРКА СА СКЛАДИШТЕМ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ**COMPLIANCE TESTING OF $U-Q/P_{max}$ AND $P-Q/P_{max}$ REQUIREMENTS FROM THE GRID CODE ON CONNECTION TO THE TRANSMISSION SYSTEM IN THE PROCESS OF CONNECTING A POWER PARK MODULE WITH ENERGY STORAGE****Vojislav Simović, Miroslav Žerajić***

Кратак садржај: У процесу прикључења објекта на преносни систем, у току пробног рада и у току њиховог целог животног века, неопходно је спроводити провере усаглашености њиховог рада са захтевима из Правила за прикључење на преносни систем. Код прикључења модула енергетског парка на преносни систем, група захтева који се односе на могућност генерисања или преузимања реактивне снаге су захтеви $U-Q/P_{max}$ и $P-Q/P_{max}$. Захтев $U-Q/P_{max}$ се проверава за цео опсег напона у тачки прикључења модула енергетског парка при константној максималној снази коју модул може да преда у тачки прикључења, док се захтев $P-Q/P_{max}$ проверава за цео опсег производње активне снаге модула, при константном напону у тачки прикључења модула енергетског парка. Уколико модул енергетског парка садржи и складиште електричне енергије, онда провера усаглашености мора да се спроводи за различите комбинације режима рада различитих делова модула. У овом раду ће бити приказана методологија по којој се проводи провера усаглашености за различите типове модула енергетског парка (ветроелектране и фотонапонске електране) са складиштем електричне енергије. Такође, биће наведени тест примери симулационе провере за све комбинације на основу којих је методологија креирана.

Кључне речи: Правила за прикључење објекта на преносни систем, складиште електричне енергије, провера усаглашености

Abstract: In the process of connecting facilities to the transmission system—during commissioning, trial operation, and throughout their operational lifetime—it is essential to verify their compliance with the Grid Connection Code requirements. For the connection of a power park module to the transmission system, a critical set of requirements relates to the ability to generate or absorb reactive power (Q), specifically: $U-Q/P_{max}$ requirement, which is evaluated across the entire voltage range at the point of connection while maintaining the

* Vojislav Simović, Elektromreža Srbije, vojislav.simovic1994@gmail.com

Miroslav Žerajić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, zm235031p@student.etf.bg.ac.rs

module's maximum active power output (P_{max}). P-Q/ P_{max} requirement, which is assessed for the entire range of active power output, at a constant voltage at the connection point. If the power park module includes an energy storage system, compliance verification must be conducted for different operating modes and combinations of the module's subsystems. This paper presents a methodology for verifying compliance for different types of energy park modules, including wind power plants (WPPs) and photovoltaic power plants (PVPPs) with integrated energy storage. Additionally, test cases for compliance simulation will be provided, forming the foundation upon which the methodology was developed.

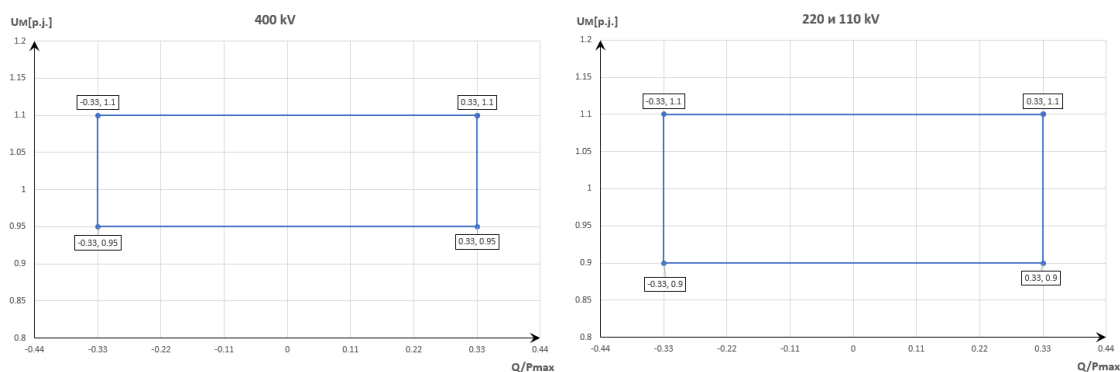
Key words: *Grid Connection Code, energy storage, compliance testing, DIgSILENT PowerFactory*

1 УВОД

Један од највећих изазова интеграције обновљивих извора енергије (ОИЕ) је њихова варијабилна и неуправљива производња. Одступања од планиране производње нарушавају равнотежу између укупне производње и потрошње система и доводе до дебаланса. Познато је да у електроенергетском систему (ЕЕС) производња и потрошња морају да буду уравнотежене. Након одступања производње или потрошње, баланс се одржава активирањем услуга регулације фреквенције: примарна, секундарна и терцијарна регулација. Ове услуге доминантно пружају производни објекти са управљивом производњом. У складу са [1], уколико Оператор преносног система (ОПС) у анализи адекватности утврди да у електроенергетском систему постоји недостатак резерве за пружање услуга регулације фреквенције, ОПС доноси обавештење о наступању услова за одлагање прикључења објеката који користе варијабилне ОИЕ. Нови објекти који користе варијабилне ОИЕ могу избећи одлагање прикључења испуњењем одређених услова који су детаљније наведени у [2]. Један од начина за избегавање одлагања прикључења је да се уз објекат који користи варијабилне ОИЕ предвиди изградња батеријског складишта електричне енергије. Наведено складиште је потребно да има снагу која је већа или једнака 10% инсталисане снаге производног објекта и капацитет који је већи или једнак вредности капацитета потребног да батеријско складиште са снагом која одговара 10% инсталисане снаге производног објекта може да ради 4 сата. За овај рад је од значаја случај када се батеријско складиште гради у склопу производног објекта због утицаја складишта на испуњење техничких захтева за прикључење на преносни систем.

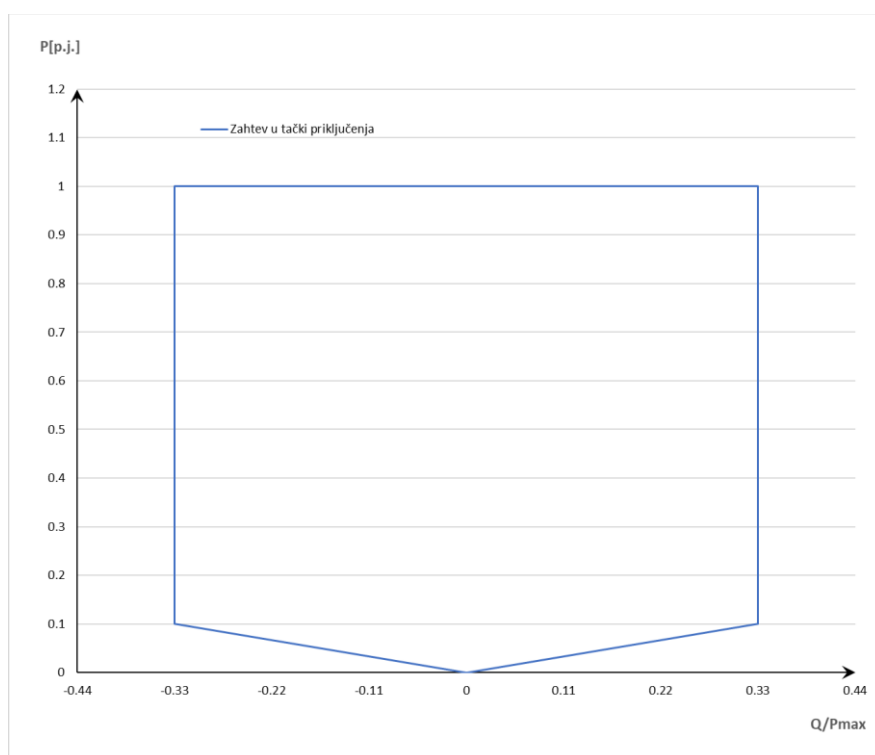
Током процеса прикључења, спроводи се симулациона провера усаглашености рада производног модула са техничким захтевима дефинисаним у [3]. Један од тих захтева који се проверава односи се на реактивне могућности производног модула, и то у два различита случаја:

1. Захтев $U-Q/P_{max}$ који дефинише обавезу да производни модул у свакој радној тачки из опсега напона (U_{min} , U_{max}) може да преузме или генерише реактивну снагу која је већа или једнака захтеваној реактивној снази дефинисаној на Слици 1. Захтев се проверава при максималној могућој активној снази у тачки прикључења производног модула.



Слика 1: Захтев $U-Q/P_{max}$ из [3] за различите напонске нивое тачке прикључења производног модула

- Захтев $P-Q/P_{max}$ који дефинише обавезу да производни модул у свакој радној тачки из опсега (0, 100)% активне снаге генерисања производног модула може да преузме или генерише реактивну снагу већа или једнака захтеваној реактивној снази дефинисаној на Слици 2. Захтев се проверава при константној вредности напона у тачки прикључења производног модула.



Слика 2: Захтев $P-Q/P_{max}$ из [3] за различите напонске нивое тачке прикључења производног модула

P_{max} из захтева је једнака:

- захтеваној одобреној снази ако је максимална снага коју је могуће инјектирати у преносну мрежу у тачки прикључења модула енергетског парка већа од одобрене снаге, или

2. максималној снази коју је могуће инјектирати у преносну мрежу у тачки прикључења модула енергетског парка ако је максимална снага коју је могуће инјектирати у преносну мрежу у тачки прикључења модула енергетског парка мања од одобрене снаге.

Уколико се Подносилац захтева у захтеву за израду Студије прикључења определи да ће обавезу из ЗКОИЕ испунити изградњом складишта и то та начин да ће складиште бити прикључено на унутрашње инсталације енергетског парка, то значи да се складиште неће посматрати као посебан објекат, јер нема своју посебну тачку прикључења на преносни систем.

2 МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОВЕРУ ЗАХТЕВА $U-Q/P_{\max}$

С обзиром на чињеницу да се захтев $U-Q/P_{\max}$ проверава за случај максималне могуће активне снаге који модул енергетског парка може да инјектира у преносну мрежу у тачки прикључења, уважавајући ограничење по одобреној снази, за проверу испуњености овог захтева, за модул енергетског парка који на унутрашње инсталације има прикључено складиште електричне енергије, разликују се два случаја:

1. Први случај: Када је максимална снага електране, не узимајући у обзир складиште, већа од одобрене снаге ,

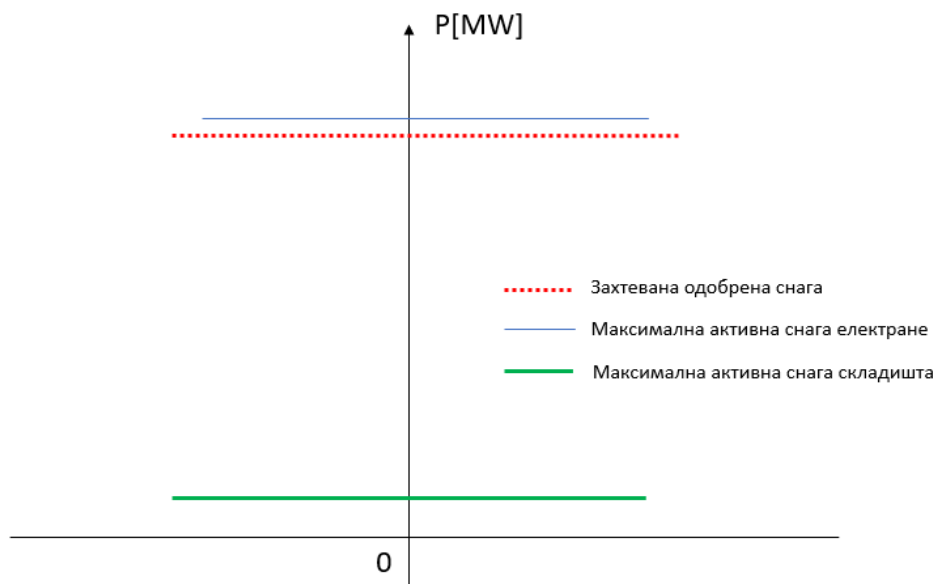
$$P_{od} \leq P_{PPmax} - P_{\gamma} \quad (1)$$

Где су:

- P_{od} — одобрена снага модула енергетског парка
- P_{PPmax} — Максимална активна снага електране
- P_{γ} — Губици активне снаге у интерној мрежи електране
- P_{PP} — Тренутна активна снага електране $P_{PP} < P_{PPmax}$
- P_{ES} — Тренутна активна снага складишта $P_{ES} \leq P_{ESmax}$
- P_{ESmax} — Максимална активна снага складишта

Захтев се у овом случају проверава за два случаја:

- а. Када је електрана ангажована активном снагом $P_{PP} = P_{od} + P_{\gamma}$
- б. Када је електрана ангажована активном снагом $P_{PP} = P_{od} - P_{ES} + P_{\gamma}$.

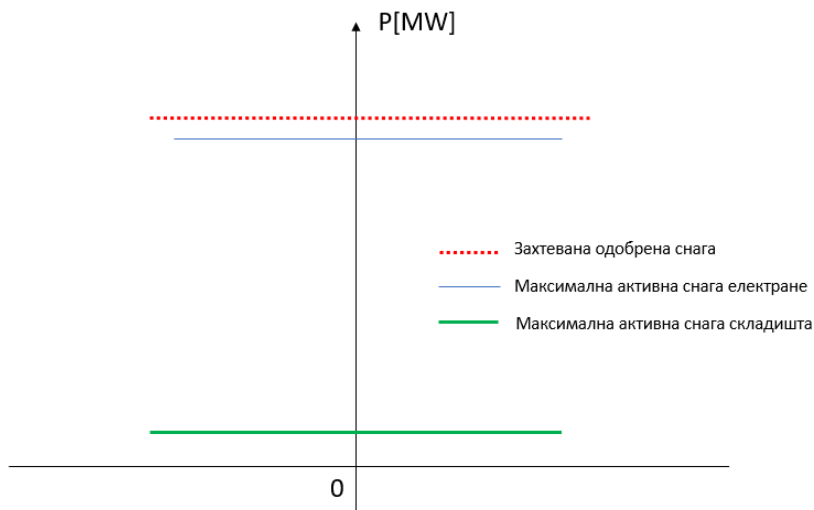


Слика 3: Илустрација случаја када је $P_{od} \leq P_{PPmax} - P_\gamma$

2. Други случај: Када одобрена снага може да се достигне само уколико је и складиште ангажовано у режиму пражњења.

$$P_{od} > P_{PPmax} - P_\gamma \quad (2)$$

$$P_{od} \leq P_{PPmax} - P_\gamma + P_{ESmax} \quad (3)$$



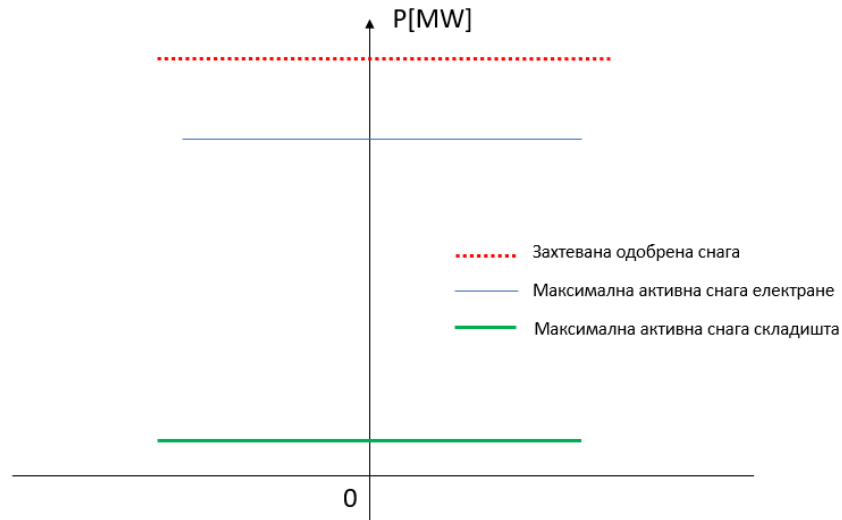
Слика 4: Илустрација случаја када је $P_{od} > P_{PPmax} - P_\gamma$ и $P_{od} \leq P_{PPmax} - P_\gamma + P_{ESmax}$

Захтев се проверава за случај када је електрана ангажована активном снагом $P_{PP} = P_{od} - P_{ES} + P_\gamma$.

3. Трећи случај: Када максимална снага у тачки прикључења не може да достигне захтевану одобрену снагу у тачки прикључења чак ни у режимима када су и

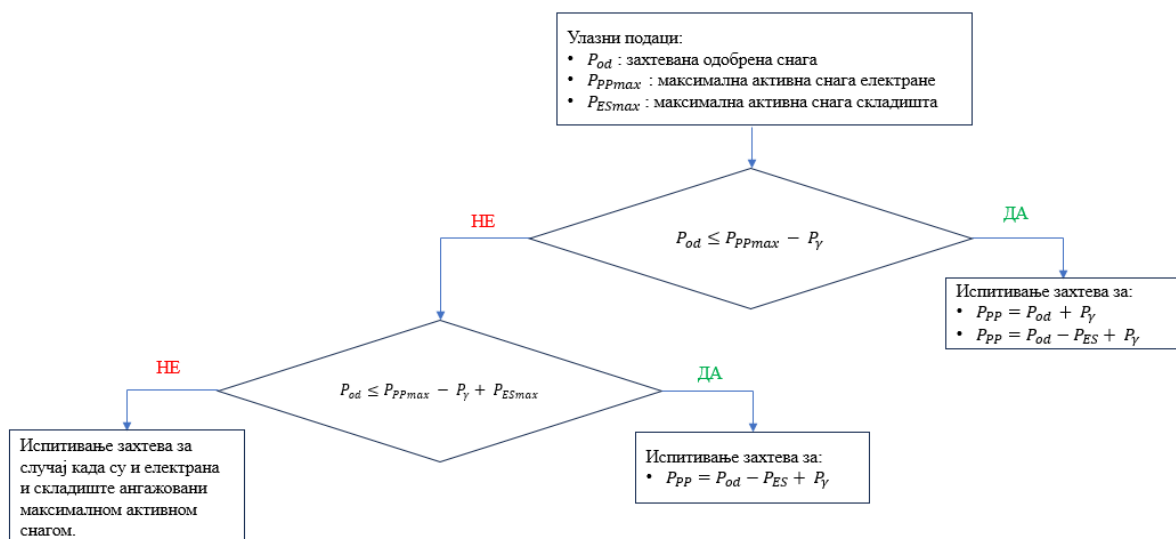
електрана и складиште у режиму пражњења ангажовани максималном активном снагом.

$$P_{od} > P_{PPmax} - P_{\gamma} + P_{ESmax} \quad (4)$$



Слика 5: Илустрација случаја када је $P_{od} > P_{PPmax} - P_{\gamma} + P_{ESmax}$

Захтев се у овом случају проверава случај када су и електрана и складиште ангажовани максималном активном снагом.

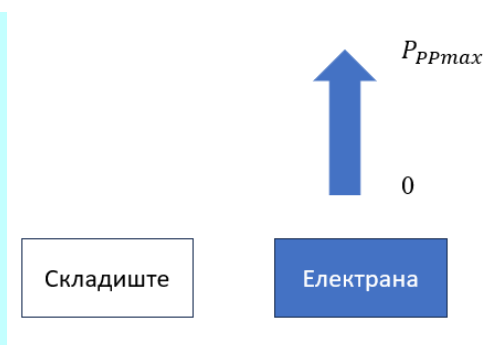


Слика 6: Приказ методологије за проверу захтева $U-Q/P_{max}$

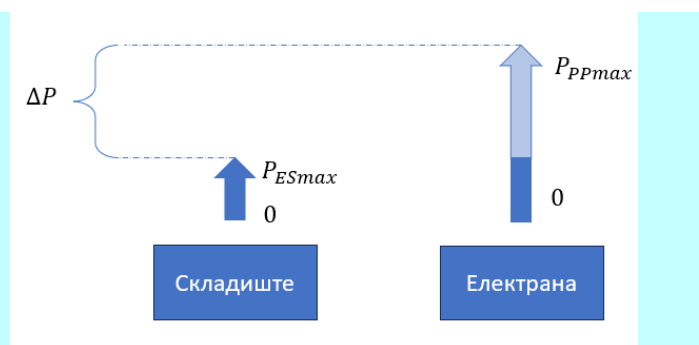
3 МЕТОДОЛОГИЈА ЗА ПРОВЕРУ ЗАХТЕВА $P\text{-}Q/P_{\max}$

За проверу испуњености захтева $P\text{-}Q/P_{\max}$, проверавају се исти случајеви у погледу ангажовања модула енергетског парка као и за захтев $U\text{-}Q/P_{\max}$. Међутим, захтев $P\text{-}Q/P_{\max}$ се проверава за цео опсег могућег ангажовања модула енергетског парка, па је број режима који је потребно испитати у оквиру сваког појединачног случаја већи, и он зависи од максималне снаге складишта, ангажовања модула енергетског парка и ангажовања складишта:

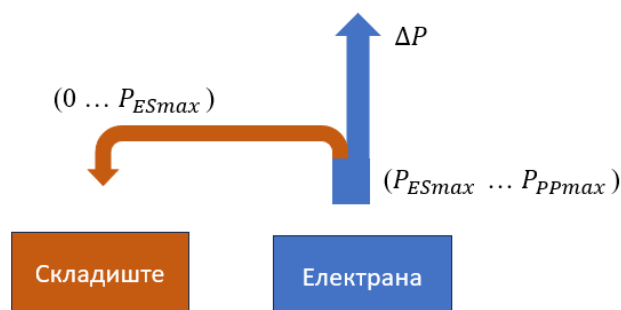
1. Први случај: Када је максимална снага у тачки прикључења, не узимајући у обзир складиште, већа од одобрене снаге, потребно је испитати следеће режиме:
 - а. Снага електране се повећава од $(0 - 100)\%$ максималне активне снаге електране и израчунава се реактивна снага у тачки прикључења, при чему се складиште не узима у обзир,
 - б. Снага складишта се повећава од 0 до P_{ESmax} , а снага електране се повећава од 0 до $(P_{PPmax} - \Delta P)$, и израчунава се реактивна снага у тачки прикључења, при чему се узима у обзир складиште које ради у режиму пражњења. ΔP је разлика максималне активне снаге електране и максималне активне снаге складишта,
 - с. Када складиште ради у режиму пуњења максималном снагом, за различита ангажовања електране, када је $P_{PP} \geq P_{ESmax}$.



Слика 7: Случај 1а – ангажовање електране и складишта



Слика 8: Случај 1б – ангажовање електране и складишта



Слика 9: Случај 1с – ангажовање електране и складишта

- Други случај: Када максимална снага у тачки прикључења може да достигне захтевану одобрену снагу само уколико је и складиште ангажовано у режиму пражњења. За овај случај, проверава се све исто као у првом случају, изузев 1а.

4 ОПИС ТЕСТ ПРИМЕРА

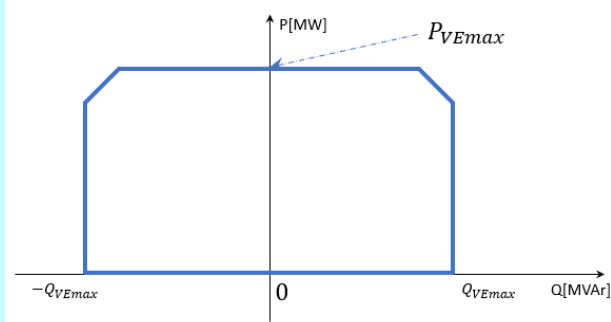
За приказ примене методологије приказане у претходна два поглавља, у овом раду ће бити коришћено укупно шест тест примера на шест електрана (три ветроелектране (ВЕ) и три фотонапонске електране (ФНЕ)), различитих максималних активних снага. Ради лакшег приказа коришћења методологије, максимална активна снага складишта, као и захтевана одобрена снага у тачки прикључења модула енергетског парка су исте за све електране. У свим тест примерима је претпостављено да су параметри каблова и трансформатора идентични како би се поредили само утицаји различитих погонских карти и конфигурација производних модула и складишта на испуњење захтева. Избор максималне снаге електране је спроведен тако да:

- Када су електране ФНЕ1 и ВЕ1 ангажоване максималном активном снагом, могуће је постићи захтевану одобрену снагу без коришћења складишта у режиму пражњења.
- Када су електране ФНЕ2 и ВЕ2 ангажоване максималном активном снагом, могуће је постићи захтевану одобрену снагу само уз коришћење складишта у режиму пражњења.
- Када су електране ФНЕ3 и ВЕ ангажоване максималном активном снагом, није могуће постићи захтевану одобрену снагу ни уз коришћење складишта у режиму пражњења.

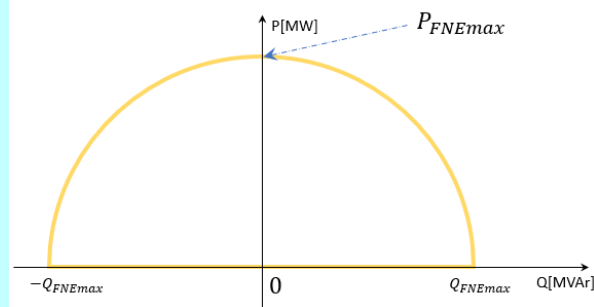
Преглед тест примера је дат у Табели 1, док су погонске карте ВЕ, ФНЕ и складишта приказане на Слици 11, 12 и 13, респективно.

Табела I: Преглед тест примера

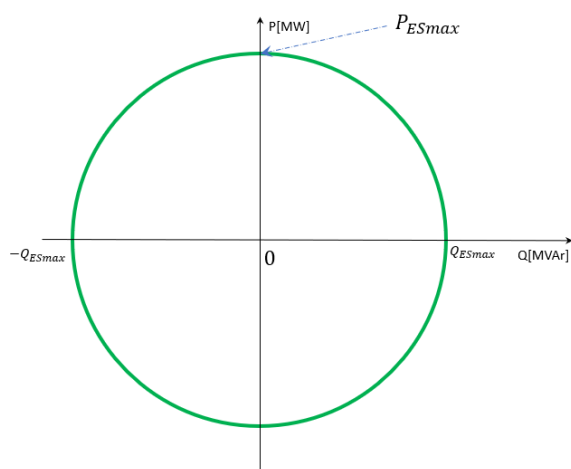
Тест пример	Електрана	Тип електране	Максимална активна снага електране [MW]	Максимална активна снага складишта [MW]	Захтевана одобрена снага [MW]
1	ФНЕ 1	ФНЕ	101	15	100
2	ФНЕ 2	ФНЕ	90	15	100
3	ФНЕ 3	ФНЕ	80	15	100
4	ВЕ1	ВЕ	101	15	100
5	ВЕ2	ВЕ	90	15	100
6	ВЕ3	ВЕ	80	15	100



Слика 11: Погонска карта ветроелектране



Слика 12: Погонска карта фотонапонске електране



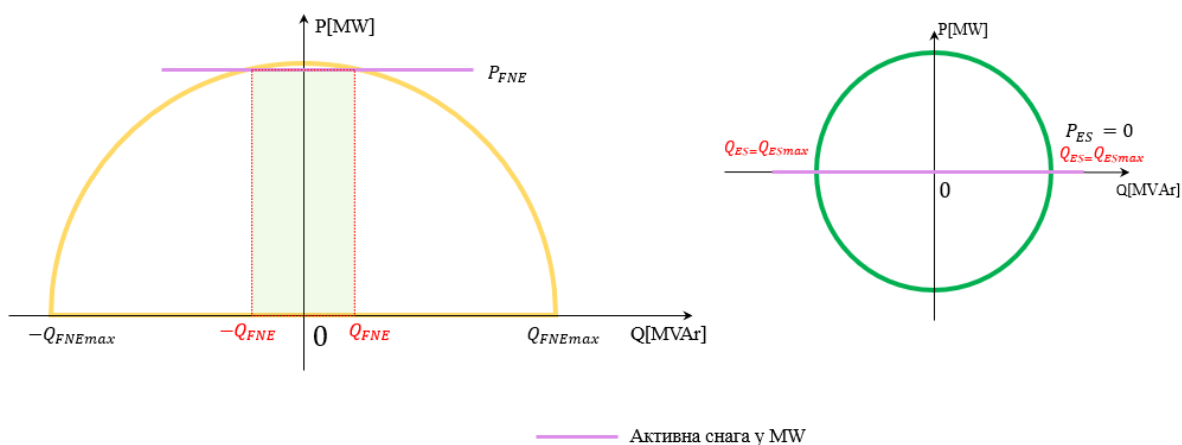
Слика 13: Погонска карта складишта

Ознаке на сликама 11, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 29 и 30 имају следеће значење:

P_{VEmax}	—	Максимална активна снага ВЕ
Q_{VEmax}	—	Максимална реактивна снага ВЕ
P_{FNEmax}	—	Максимална активна снага ФНЕ
Q_{FNEmax}	—	Максимална реактивна снага ФНЕ
P_{ESmax}	—	Максимална активна снага складишта
Q_{ESmax}	—	Максимална реактивна снага складишта

5 РЕЗУЛТАТИ ПРОВЕРЕ ЗАХТЕВА $U-Q/P_{\max}$ НА ТЕСТ ПРИМЕРИМА

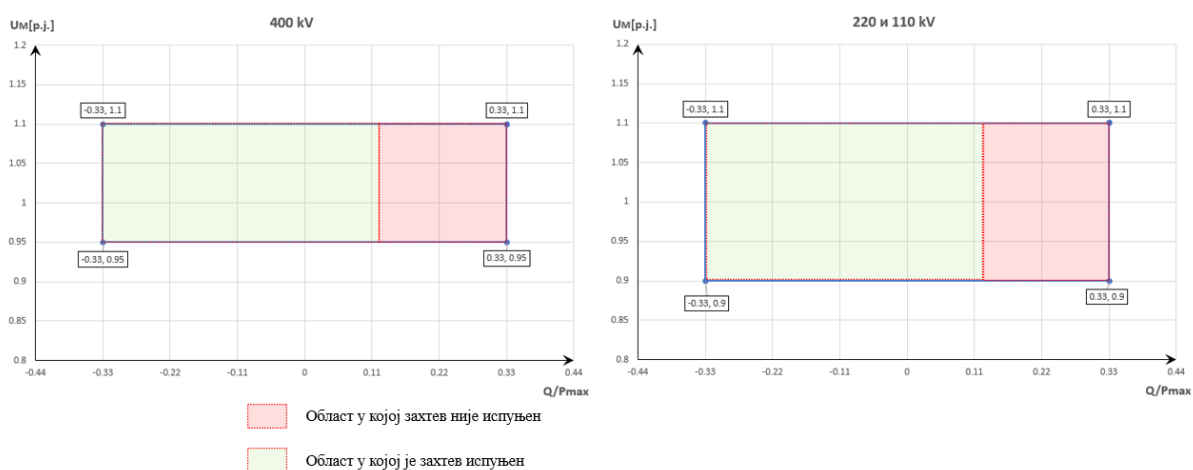
Резултати испуњености захтева $U-Q/P_{\max}$, за тест примере који су наведени у претходном поглављу су приказани на наредним сликама.



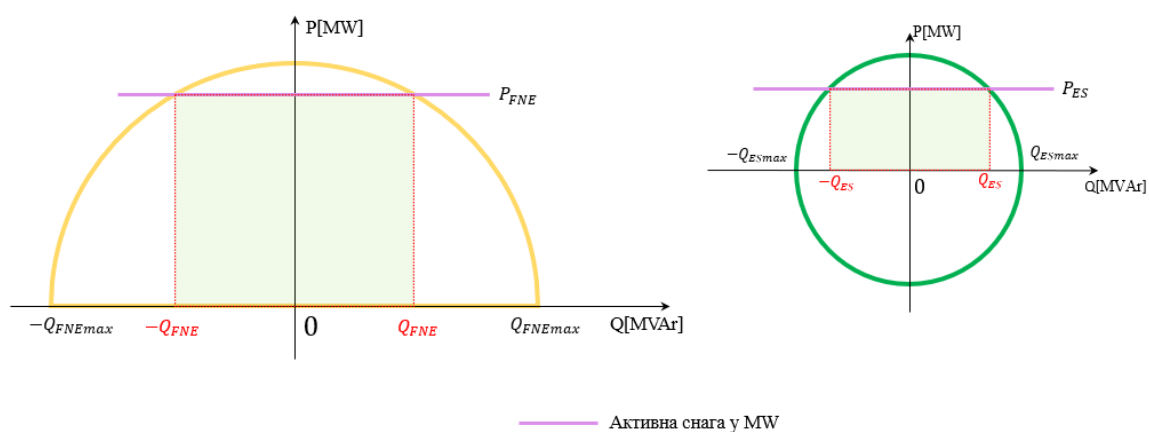
Слика 14: Тест пример 1- Реактивна могућност у тест примеру када је електрана ангажована активном снагом $P_{PP} = P_{od} + P_{\gamma}$

Ознаке на Сликама 14, 16, 18 и 20 које нису наведене на сликама 11,12 и 13, имају следеће значење:

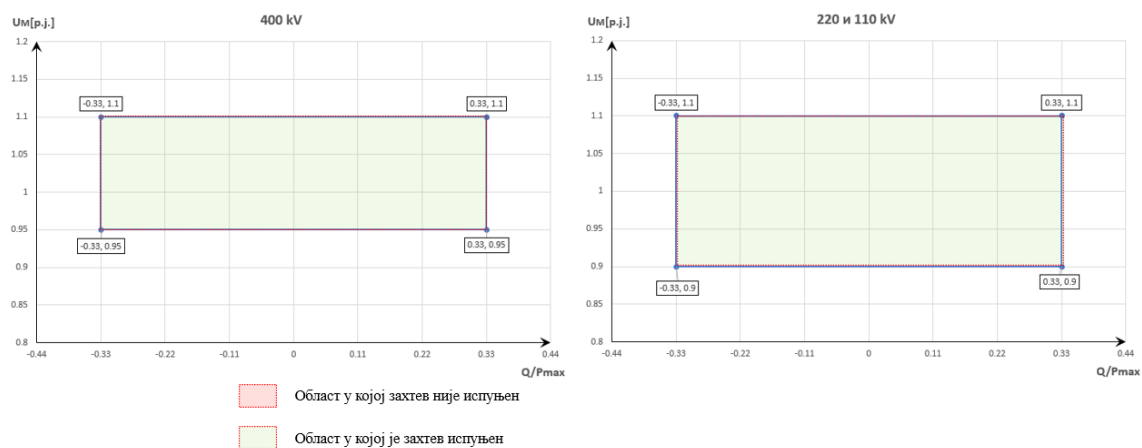
- P_{FNE} — Активна снага соларне ФНЕ
- Q_{FNE} — Реактивна снага ФНЕ
- Q_{ES} — Реактивна снага складишта



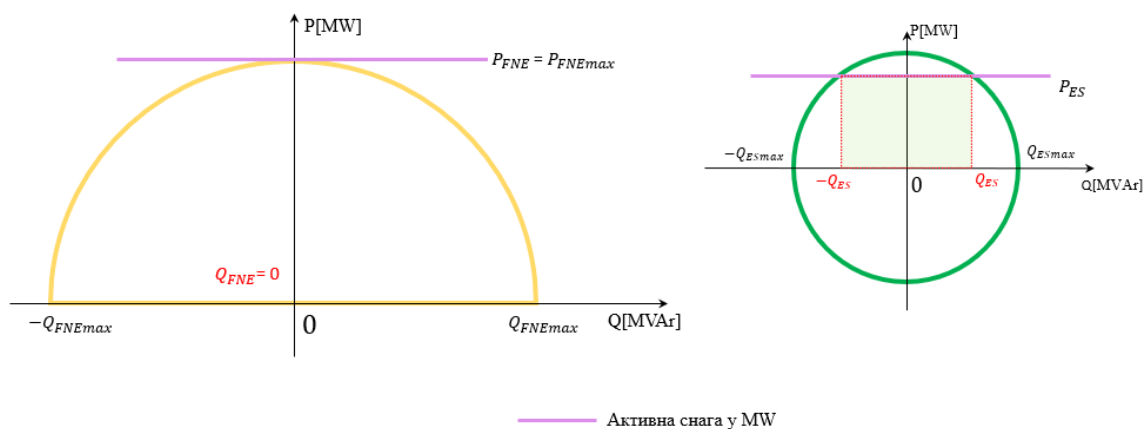
Слика 15: Тест пример 1- Испуњеност захтева у тест примеру када је електрана ангажована активном снагом $P_{PP} = P_{od} + P_{\gamma}$



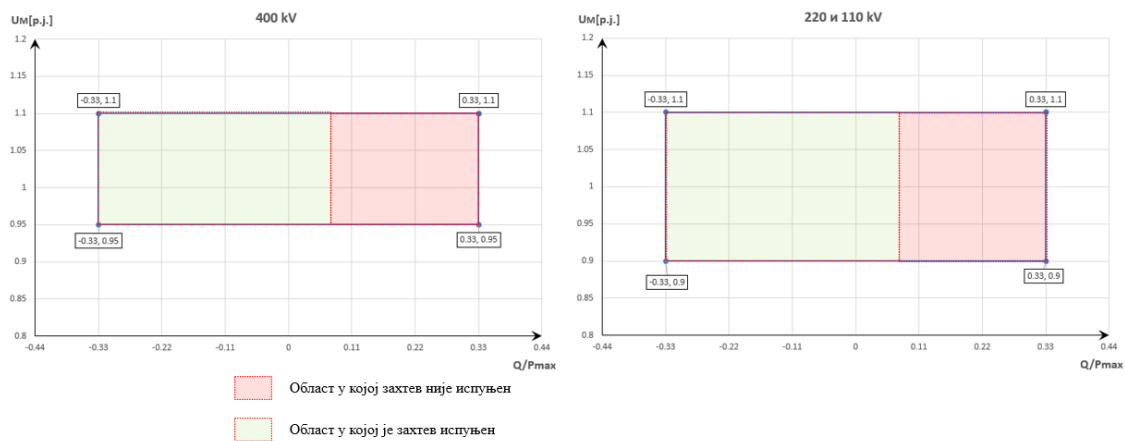
Слика 16: Тест пример 1- Реактивна могућност у тест примеру када је електрана ангажована активном снагом $P_{PP} = P_{od} - P_{ES} + P_{\gamma}$



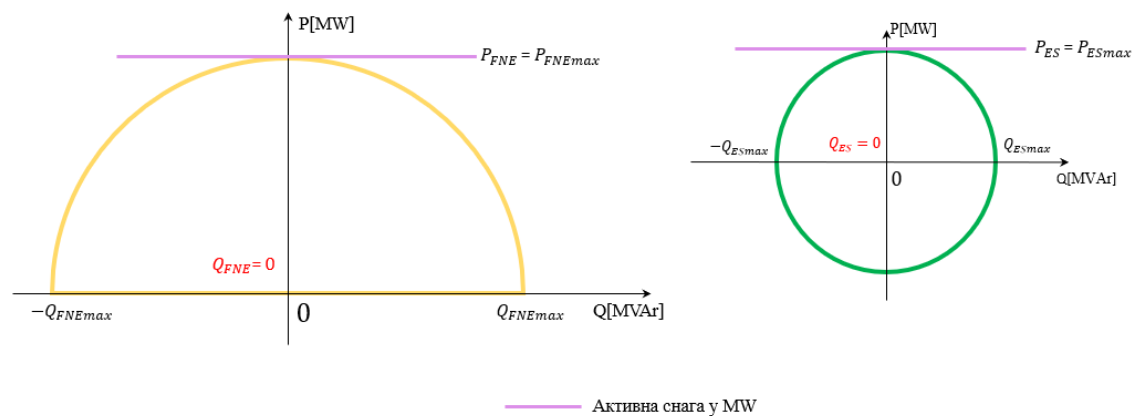
Слика 17: Тест пример 1- Испуњеност захтева у тест примеру када је електрана ангажована активном снагом $P_{PP} = P_{od} - P_{ES} + P_{\gamma}$



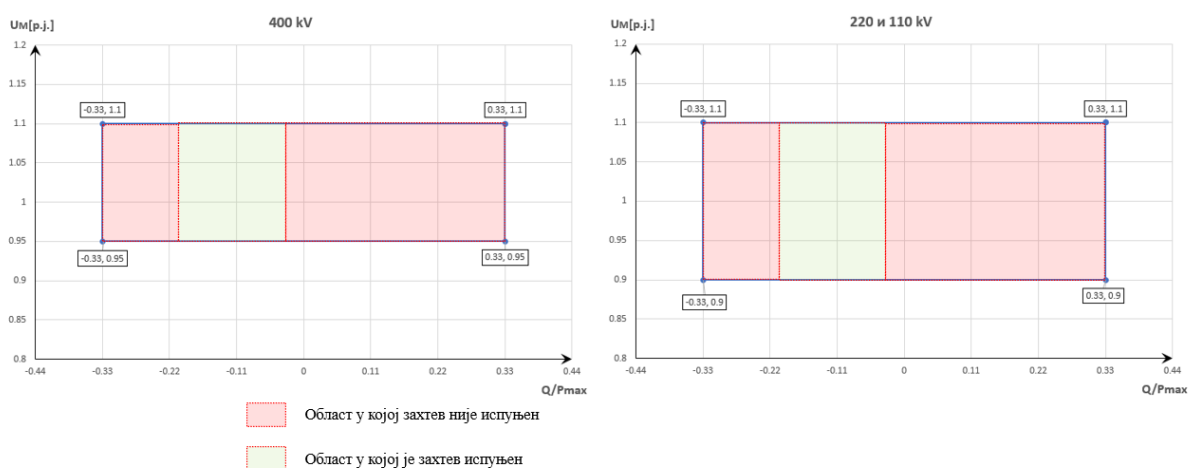
Слика 18: Реактивна могућност у тест примеру 2



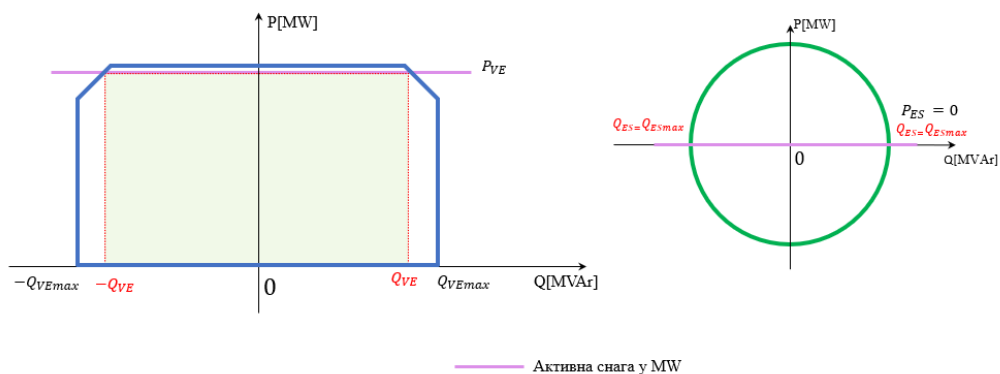
Слика 19: Испуњеност захтева у тест примеру 2



Слика 20: Реактивна могућност у тест примеру 3



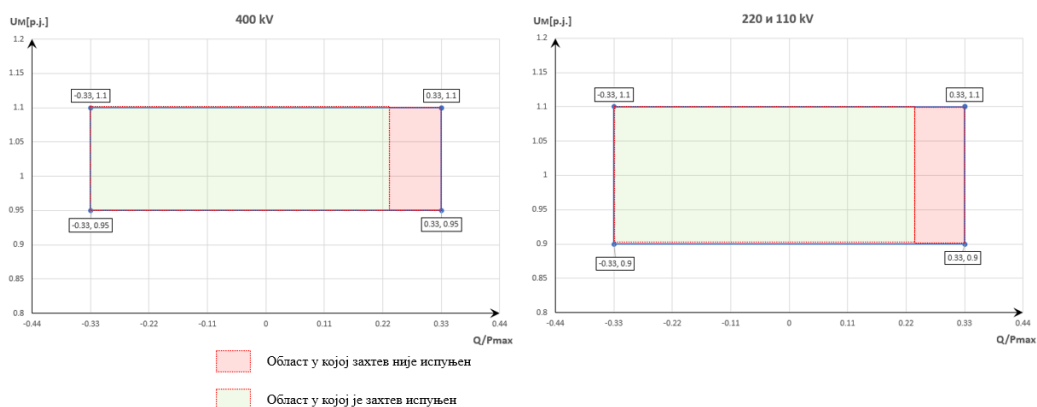
Слика 21: Испуњеност захтева у тест примеру 3



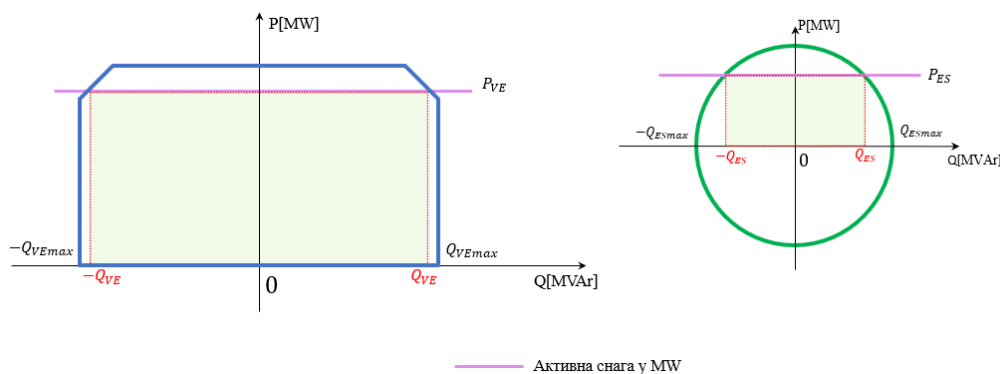
Слика 22: Реактивна могућност у тест примеру 4

Ознаке на Сликама 22, 24 и 26 које нису наведене на сликама 11,12 и 13, имају следеће значење:

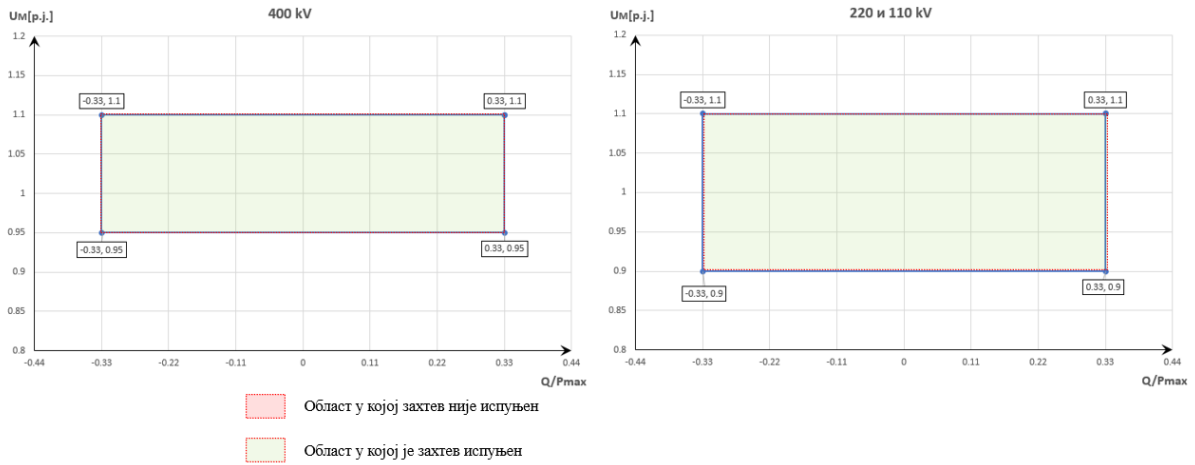
- P_{VE} — Активна снага ВЕ
- Q_{VE} — Реактивна снага ВЕ
- Q_{ES} — Реактивна снага складишта



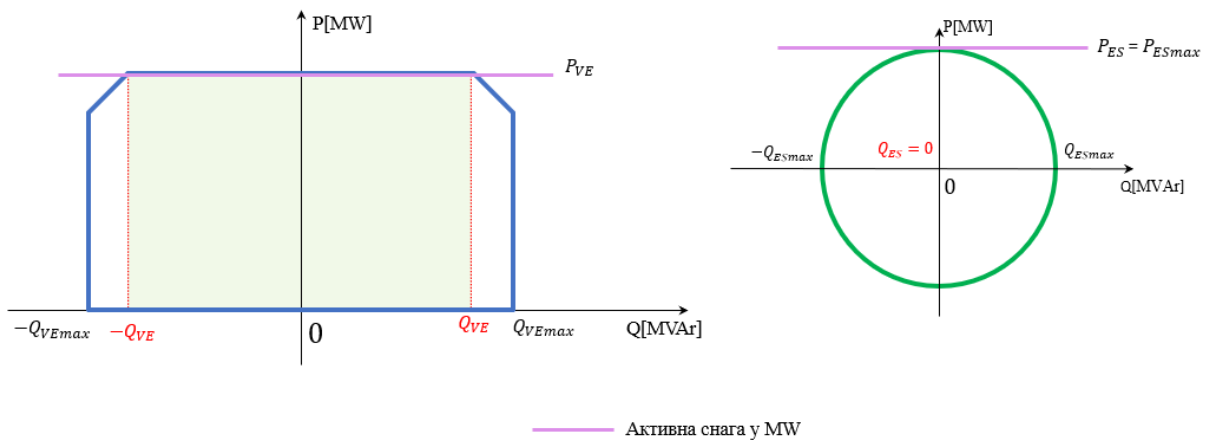
Слика 23: Испуњеност захтева у тест примеру 4



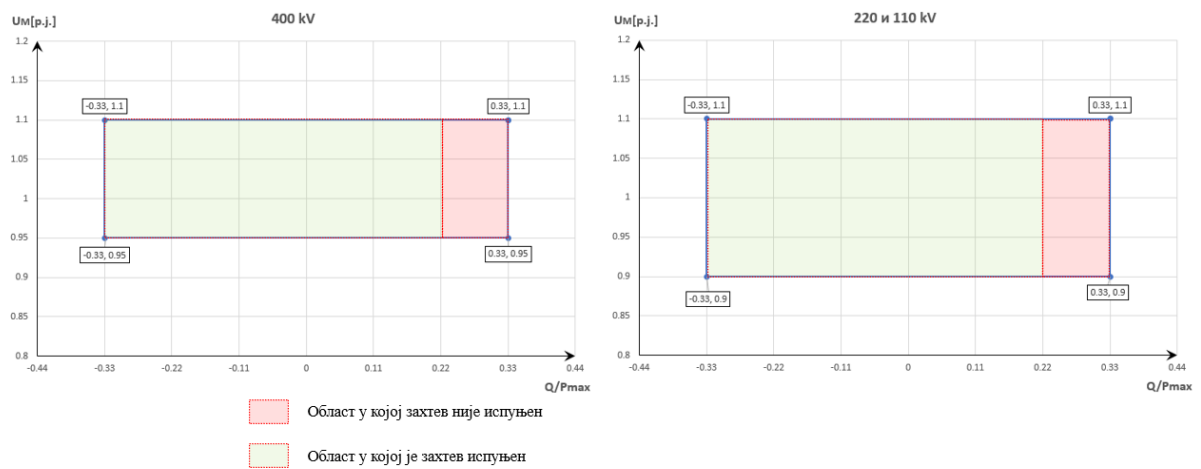
Слика 24: Реактивна могућност у тест примеру 5



Слика 25: Испуњеност захтева у тест примеру 5



Слика 26: Реактивна могућност у тест примеру 6

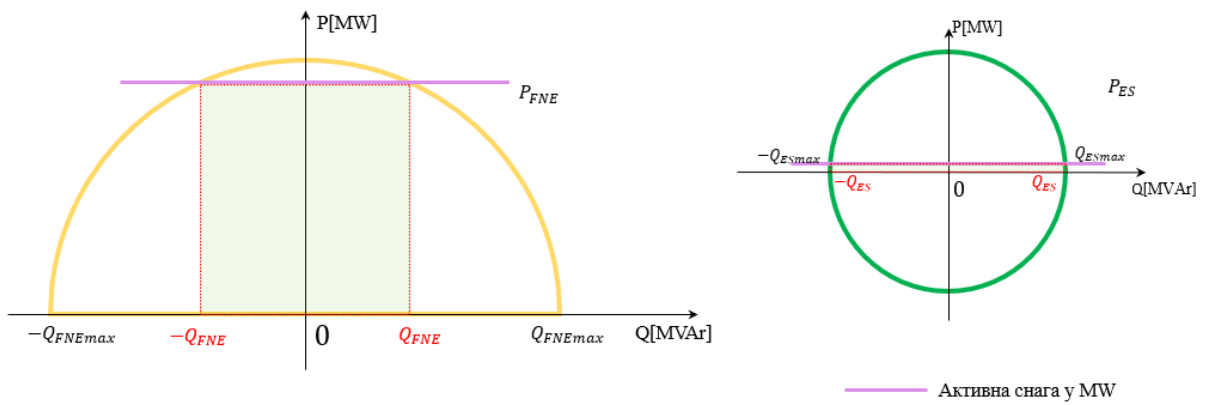


Слика 27: Испуњеност захтева у тест примеру 6

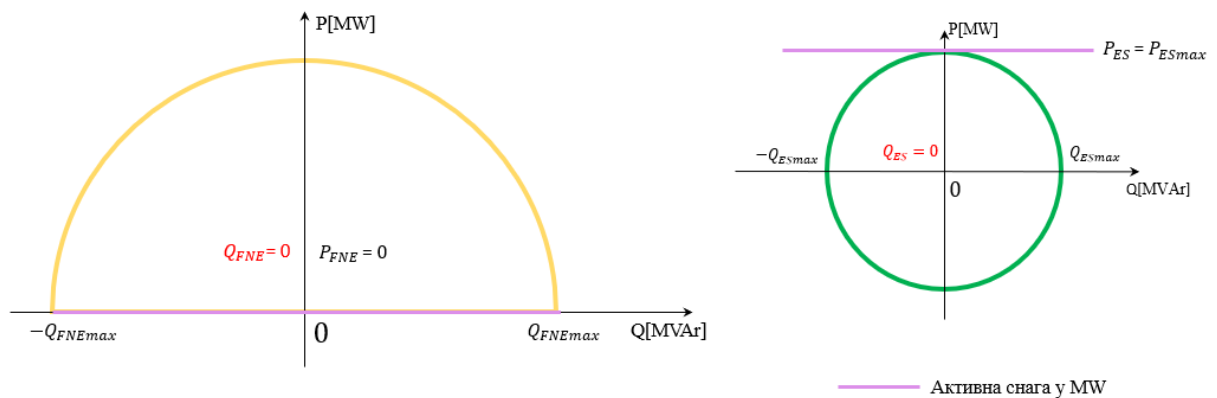
6 РЕЗУЛТАТИ ПРОВЕРЕ ЗАХТЕВА P - Q/P_{max} НА ТЕСТ ПРИМЕРИМА

Испуњеност захтева P - Q/P_{max} када модул енергетског парка ради са максималном активном снагом је обухваћена провером испуњености захтева U - Q/P_{max} . За снаге које су мање од максималне, према погонским картама које су приказане у поглављу 4, реактивна могућност модула енергетског парка се проширује, што доприноси лакшој испуњености самог захтева. Међутим, када модула енергетског парка садржи и складиште, постоје три критична режима за испуњеност захтева P - Q/P_{max} :

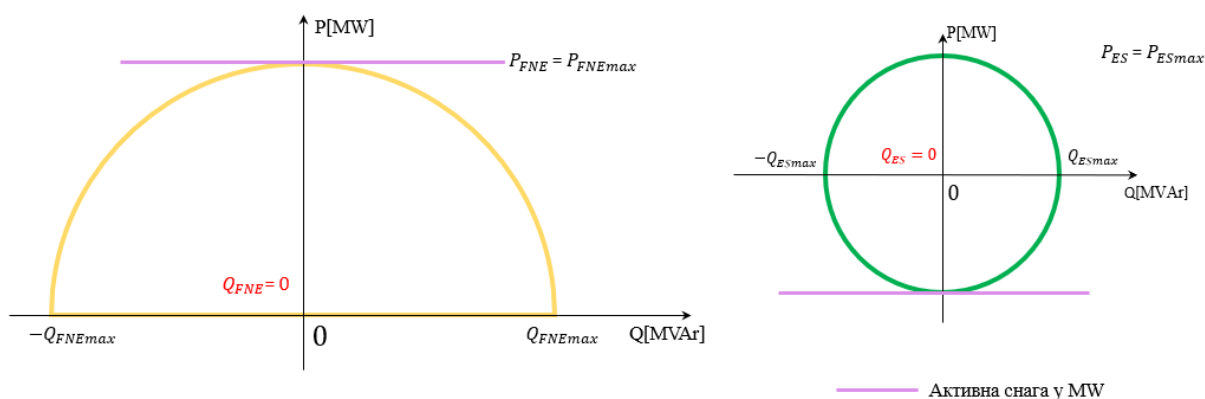
1. Када електрана ради са снагама које су блиске максималној, а складиште не ради или је ангажовано снагом блиској нули (критични случај 1),
2. Када електрана не ради, а складиште ради у режиму пражњења максималном снагом,
3. Када складиште ради у режиму пуњења максималном снагом, за различита ангажовања електране, када је $P_{PP} \geq P_{ESmax}$.



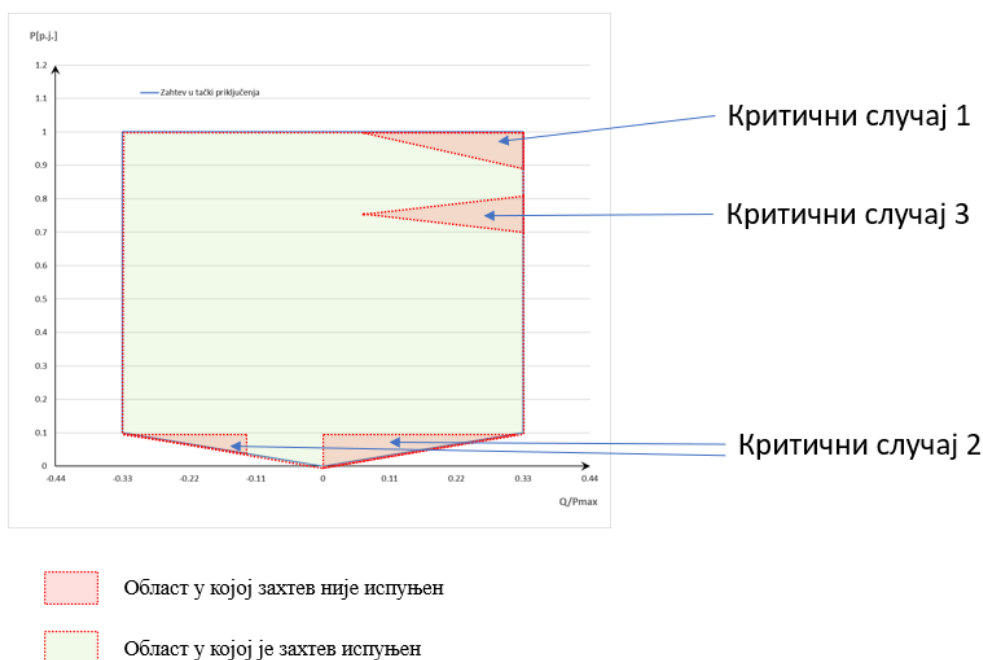
Слика 28: Реактивна могућност за критични случај 1



Слика 29: Реактивна могућност за критични случај 2



Слика 30: Реактивна могућност за критични случај 3



Слика 31: Испуњеност захтева – приказ за сва три критична случаја

Испуњеност захтева $U-Q/P_{max}$ која је приказана у претходном поглављу је показала сличне закључке за ФНЕ и ВЕ, уз бољу реактивну могућност ВЕ при снагама које су блиске максималној. Исти закључак важи и за захтев $P-Q/P_{max}$, па резултати за ВЕ због прегледности неће бити приказани у овом раду.

7 ЗАКЉУЧАК

У овом раду је приказана методологија за проверу испуњености захтева $U-Q/P_{max}$ и $P-Q/P_{max}$, који су дефинисани у [3]. Захтев $P-Q/P_{max}$ је дефинисан 2023. године, и представља проширење до тада јединог захтева за реактивну могућност модула енергетског парка $U-Q/P_{max}$.

На основу изложене методологије и њене примене на тест примерима, могу да се изведу следећи закључци:

1. Испуњеност захтева $P-Q/P_{max}$ за модул енергетског парка који садржи складиште електричне енергије може захтевати додатну компензацију реактивне снаге (или неко другачије техничко решење) при ангажовању снагама које су мање од максималне.
2. Складиште електричне енергије може смањити или потпуно елиминисати потребу за додатном компензацијом реактивне снаге за испуњеност захтева $U-Q/P_{max}$.
3. Испуњеност захтева $U-Q/P_{max}$ и $P-Q/P_{max}$ за модул енергетског парка који садржи складиште електричне енергије зависи од максималне снаге складишта и максималне снаге електране.
4. У овом раду није анализиран утицај параметара каблова и параметара трансформатора на испуњеност захтева $U-Q/P_{max}$ и $P-Q/P_{max}$ за модул енергетског парка који садржи складиште електричне енергије, већ само утицај погонске карте инвертора, јер је циљ рада био да се идентификују критични режими које је потребно проверити и тест примери су одабрани тако да се покаже употреба предложене методологије.

8 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Правила за прикључење објеката на преносни систем, Новембар 2023. године
- [2] Правилник о начину доказивања испуњености услова којима се одлагање прикључења не примењује на објекте који користе варијабилне обновљиве изворе енергије („Сл. гласник РС”, бр. 76/2023)
- [3] Закон о коришћењу обновљивих извора енергије („Сл.гласник РС“, бр. 40/2021, 35/2023 и 94/2024-др.закон)