

Mateo Beus
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
mateo.beus@fer.hr

Hrvoje Pandžić
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
hrvoje.pandzic@fer.hr

Matej Krpan
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
matej.krpan@fer.hr

Igor Kuzle
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
igor.kuzle@fer.hr

KORIŠTENJE MODELSKOG PREDIKTIVNOG UPRAVLJANJA ZA OPTIMIZACIJU POGONA SUPERKONDENZATORA U SVRHU PRUŽANJA PRIMARNE REGULACIJE FREKVENCije

SAŽETAK

U ovom referatu se predstavlja nelinearni dinamički model superkondenzatora s odgovarajućim upravljačkim sustavom. Predloženi upravljački sustav sastoji se od dva upravljačka sloja: donji upravljački sloj upravlja pretvaračem dok je gornji upravljački sloj odgovoran za pružanje postavnih vrijednosti djelatne snage za punjenje/praznjenje koje će potom pratiti donji upravljački sloj. U referatu je naglasak stavljen na razvoj gornjeg upravljačkog sloja za pružanje primarne regulacije frekvencije. U tom smislu testirana su dva simulacijska slučaja. U prvom slučaju gornji upravljački sloj je razvijen korištenjem klasičnog PID regulatora. U drugom slučaju gornji upravljački sloj je razvijen korištenjem algoritma modelskog prediktivnog upravljanja (engl. Model Predictive Control – MPC) zasnovanog na korištenju internog linearnog predikcijskog modela nelinearnog superkondenzatora. Odziv MPC regulatora je uspoređen s odzivom PID regulatora. U oba simulacijska slučaja korišten je nelinearni simulacijski model superkondenzatora.

Ključne riječi: regulacija frekvencije, modelsko prediktivno upravljanje, dinamika elektroenergetskog sustava, superkondenzator

A MODEL PREDICTIVE CONTROL APPROACH TO OPERATION OPTIMIZATION OF AN ULTRACAPACITOR BANK FOR FREQUENCY CONTROL

ABSTRACT

This paper presents a nonlinear dynamic simulation model of an ultracapacitor (UC) bank and the associated control system. The proposed control system consists of two levels: the lower level controls the inverter of the UC bank, while the upper control level is responsible for providing charging/discharging active power set points to be followed by the lower control level. This paper focuses on the development of the upper control level for frequency control. Specifically, two simulation cases are applied. In the first case the upper control level is developed using a classical Proportional-Integral-

Derivative (PID) controller. In the second case the upper control level is developed using a Model Predictive Control (MPC) algorithm based on internal linear prediction model of a nonlinear UC bank. The response of the MPC-controlled UC bank is compared to the PID-controlled UC bank. In both cases, a nonlinear UC bank simulation model is used.

Key words: frequency control, model predictive control, power system dynamics, ultracapacitor

1. UVOD

Trend povećanja udjela obnovljivih izvora energije (OIE) koji se preko uređaja učinske elektronike integriraju u elektroenergetski sustav (EES) posljedično je doveo do smanjenja inercije sustava što je motiviralo mnoge istraživače da usmjere svoja istraživanja prema razumijevanju stabilnosti sustava s niskom razinom inercije te razvoja novih algoritama koji omogućavaju takvim izvorima da sudjeluju u regulaciji frekvencije kao i pružanju pomoćnih usluga [1]. Trenutačno tehnologije koje najviše obećavaju u rješavanju problema naponske i frekvencijske stabilnosti uzrokovane integracijom OIE preko uređaja učinske elektronike u EES su tehnologije spremnika kao što su baterije, zamašnjaci i superkondenzatori.

Superkondenzatori kao tehnologija spremnika energije mogu se samostalno koristiti za pružanje potpore EES-u ili u kombinaciji s nekom drugom tehnologijom spremnika ili OIE s učinskom elektronikom tvoreći tako hibridni sustav spremnika. Superkondenzatore karakterizira visoka gustoća energije kao i mogućnost izvođenja nekoliko stotina tisuća ciklusa punjenja i pražnjenja, te mogućnost brzog pražnjenja. Prethodno spomenute značajke podupiru tvrdnju da su superkondenzatori jedna od najboljih tehnologija za rješavanje problema frekvencijskih poremećaja u EES-u koji zahtijevaju brzu apsorpciju ili injekciju djelatne snage. Nadalje, superkondenzatori se mogu koristiti i za brzu stabilizaciju proizvodnje iz varijabilnih OIE kao što su fotonaponske elektrane ili vjetroelektrane.

Glavne prednosti superkondenzatora u usporedbi s drugim tehnologijama spremnika su:

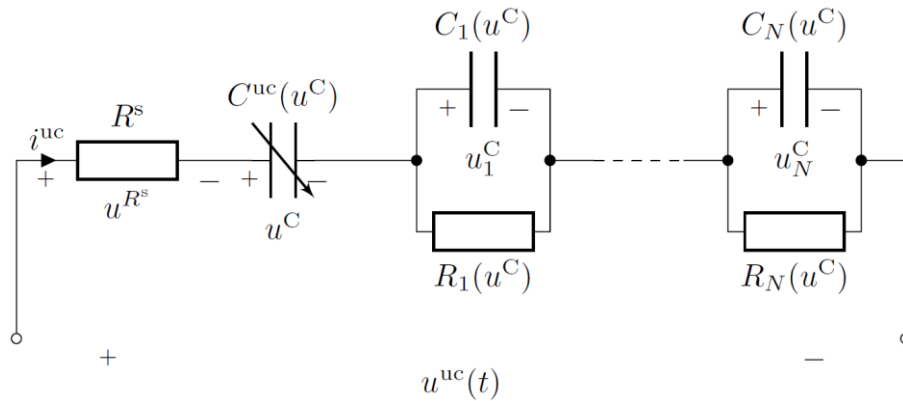
- Superkondenzator se može u potpunosti napuniti/isprazniti u vremenskom rasponu od nekoliko desetaka sekundi;
- Nazivna snaga punjenja/pražnjenja superkondenzatora se može doseći unutar nekoliko milisekundi;
- Superkondenzatori imaju veću gustoću snage nego baterije ili zamašnjaci (dimenzije superkondenzatora velike snage su značajno manje od baterijskom spremnika iste snage);
- Superkondenzatori mogu izdržati značajno više ciklusa punjenja/pražnjenja u usporedbi s baterijskim spremnicima;
- Troškovi pogona i održavanja superkondenzatora su značajno niži u usporedbi s baterijskim spremnicima i zamašnjacima.

U ovo referatu predstavljen je algoritam modelskog prediktivnog upravljanja (MPC) za regulaciju frekvencije koristeći superkondenzator. Trenutačno se automatska regulacija snage i frekvencije gotovo isključivo obavlja koristeći klasične PID regulatore koji su dobro poznati i pouzdani [2]. Konvencionalne elektrane i veliki baterijski spremnici u pravilu imaju više nego dovoljno energije u normalnom pogonu u vremenskom rasponu inercijskog odziva i primarne regulacije frekvencije (30 sekundi) tako da upravljanje zasnovano na PID regulatorima u većini slučajeva ima zadovoljavajuće performanse. Međutim, ovo nije slučaj kod superkondenzatora. Naime, superkondenzatori su energetske ograničeni te mogu zadržati svoj profil snage tijekom ograničenog razdoblja, tj. nazivna snaga se može održati samo tijekom razdoblja od nekoliko desetaka sekundi do minute što odgovara vremenskoj skali primarne regulacije frekvencije. Izlazna snaga superkondenzatora ovisi o parametrima PID regulatora kao i o veličini poremećaja. Dakle, superkondenzatori čije je upravljanje procesom pražnjenja zasnovano na korištenju PID regulatora mogu se brzo isprazniti (doseći minimalnu razinu napona) pritom injektirajući još neku malu snagu. Ovo može uzrokovati dodatni poremećaj u sustavu te veće frekvencijsko odstupanje kao i prenapone. Budući da se veličina poremećaja ne može predvidjeti, nemoguće je izabrati optimalne parametre PID regulatora koji pružaju maksimalnu potporu djelatnom snagom pritom izbjegavajući mogućnosti propada snage u svim pogonskim scenarijima. U cilju rješavanja prethodno spomenutih problema predložen je MPC algoritam koji u formulaciji upravljačkog problema uključuje ograničenja

superkondenzatora s ciljem osiguranja zadovoljavajućeg odziva snage na poremećaje različitih veličina. Nadalje, odziv MPC-a je uspoređen s odzivom klasičnog PID regulatora za različite veličine poremećaja s ciljem demonstriranja prednosti MPC-a nad PID regulatorima.

2. MODEL SUPERKONDENZATORA

Jezgru modela superkondenzatora čini kondenzatorska ćelija. Detaljan opis ekvivalentnog RC kruga kondenzatorske ćelije koji je eksperimentalno identificiran moguće je pronaći u literaturi [3-5]. Za analizu brzih odziva (nekoliko desetaka sekundi do minute) dovoljno je promatrati ponašanje RC kruga prikazanog na Slici 1 gdje C^{uc} predstavlja kapacitet superkondenzatora. Konačan niz paralelno spojenih RC članaka $R_1C_1 - R_NC_N$ spojenih u seriju s kondenzatorom C^{uc} modeliraju poroznost elektroda superkondenzatora. Eksperimentalna istraživanja provedena u [5] su pokazala da je korištenje 5 RC grupa više nego dovoljno da se dobije zadovoljavajuća preciznost modela. Kapacitet C^{uc} kao i RC grupe R_n i C_n ovise o naponu superkondenzatora $u^c(t)$. Ovaj model je nelinearan s vremenski promjenjivim parametrima što je glavni razlog zašto model idealnog kondenzatora nema zadovoljavajuću točnost u primjenama za regulaciju frekvencije.



Slika 1.: Ekvivalentni RC krug ćelije superkondenzatora

Model superkondenzatora se realizira povezujući određeni broj ćelija N^s u seriju da se ostvari željena nazivna naponska razina te određeni broj ćelija N^p u paralelu da se ostvari željena nazivna strujna razina. Dinamički model superkondenzatora se može izvesti koristeći ekvivalentni krug prikazan na Slici 1. uzimajući struju i^{uc} kao ulaznu veličinu, napon u^{uc} kao izlaznu veličinu te napone kondenzatora u^c i u_n^c kao varijable stanja. Zahtijevana ulazna struja se računa iz izlazne snage pretvarača i napona superkondenzatora. Potpuni nelinearni model superkondenzatora je analitički opisan koristeći jednadžbe (1)-(6).

$$u^{uc}(t) = i^{uc}(t)R + u^c(t) + \sum_{n=1}^N u_n^c = y(t) \quad (1)$$

$$i^{uc}(t) = u(t) = \frac{P^{inv}(t)}{u^{uc}(t)} \quad (2)$$

$$u^{uc,s}(t) = N^s u^{uc}(t) = N^s y(t) \quad (3)$$

$$i^{uc,p}(t) = N^p i^{uc}(t) = N^p u(t) \quad (4)$$

$$\frac{du^c}{dt} = \frac{i^{uc}(t)}{C_0 + k^v u^c(t)} \quad (5)$$

$$\frac{du_n^c}{dt} = -\frac{u_n^c}{R_n C_n} + \frac{i^{uc}(t)}{C_n} \quad (6)$$

U jednadžbi (5) C_0 predstavlja kapacitet superkondenzatora pri 0 V dok je k^v konstanta izražena u F/V.

3. MODELSKO PREDIKTVNO UPRAVLJANJE

U ovom poglavlju ukratko je objašnjen sam koncept MPC-a bez ulaska u detalje pojedinih varijanti MPC algoritama. Nadalje, prikazana je i upravljačka struktura korištena za implementaciju predloženog MPC algoritma za regulaciju frekvencije koristeći superkondenzator.

3.1. Koncept modelskog prediktivnog upravljanja

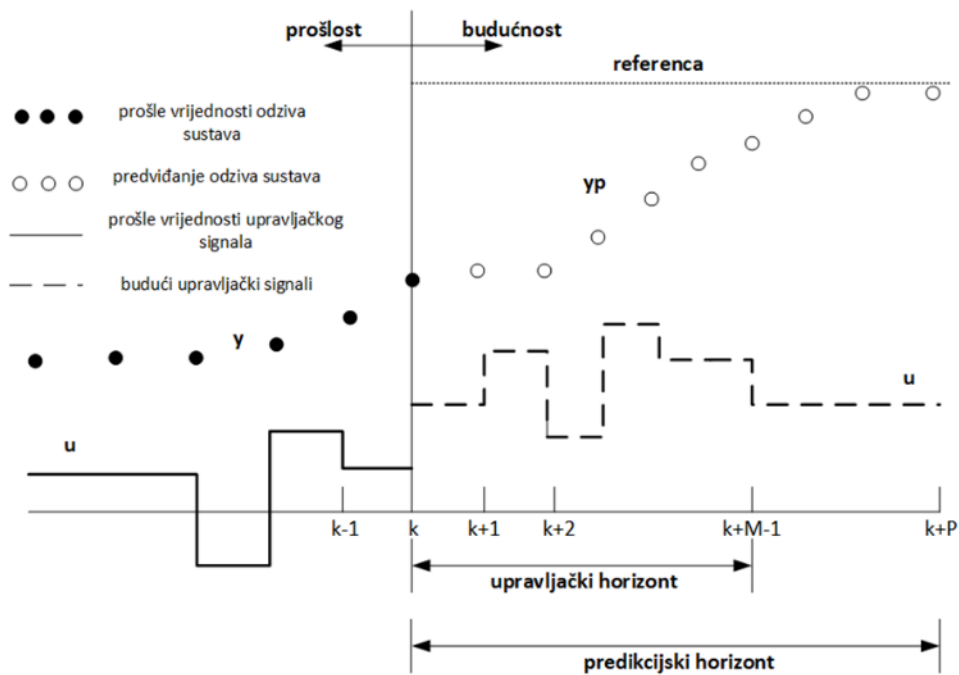
Glavna ideja MPC-a je da se unutar regulatora uključi model reguliranog procesa koji se koristi za predviđanje odziva procesa koristeći prošle i trenutnu vrijednost odziva sustava, kao i prošle vrijednosti upravljačke veličine. Dakle, definira se optimizacijski problem koji može uzimati u obzir različite kriterije kao što su minimizacija troškova rada sustava, minimizacije odstupanja predviđanja odziva sustava od postavne vrijednosti, minimizacija upravljačkih napora, itd. Pojedini kriteriji dobivaju prednost u odnosu na neke druge kriterije tako što se definiraju različite vrijednosti faktora penaliziranja za svaki kriterij koji je uključen u funkciju cilja optimizacijskog problema. Nadalje, u sam optimizacijski problem mogu biti uključene i različite vrste ograničenja kao što su iznos minimalne i maksimalne promjene vrijednosti upravljačke veličine, minimalni i maksimalni iznos vrijednosti upravljačke veličine te odziva sustava, kao i razna druga ograničenja [6-7]. Činjenica da se ograničenja koja se odnose na sam upravljački algoritam mogu uključiti u proces dizajniranja regulatora daju MPC-u prednost u odnosu na klasične regulatore. Dodatna prednost MPC-a je da se upravljački algoritam koji je projektiran za sustave s jednim ulazom i jednim izlazom relativno jednostavno može proširiti i na sustave s više ulaza i više izlaza [8].

Općenito, MPC funkcionira tako da u svakom trenutku uzorkovanja optimizacijski algoritam računa vrijednosti upravljačke veličine za nekoliko koraka unaprijed koristeći predikcijski model procesa uz zadovoljenje svih kriterija optimizacijskog problema. Predikcijski horizont određuje koliko koraka unaprijed se računa predviđanje odziva sustava, dok upravljački horizont određuje za koliko koraka unaprijed se računa vrijednost optimalne upravljačke sekvence.

Nakon što se dobije vrijednost optimalne upravljačke sekvence, u danom trenutku na sustav se primjenjuje samo prvi član upravljačke sekvence budući da su u sljedećem trenutku već dostupna mjerenja odziva sustava za taj trenutak koja se potom koriste za izračun nove optimalne upravljačke sekvence na cijeloj duljini upravljačkog i predikcijskog horizonta koji su sada pomjereni za jedno mjesto.

Na Slici 2. prikazan je osnovni koncept modelskog prediktivnog upravljanja. Na njoj se mogu vidjeti glavni koraci koji se primjenjuju u upravljačkom algoritmu zasnovanom na MPC-u. Procedura izvršavanja MPC-a je sljedeća:

- u trenutku k rješava se optimizacijski problem s ciljem pronalaska optimalne upravljačke sekvence za M koraka unaprijed;
- prvi element optimalne upravljačke sekvence se primjenjuje na regulirani sustav dok se ostali elementi odbacuju;
- u trenutku $k+1$ novo stanje sustava se određuje mjerenjem ili estimacijom;
- u trenutku $k+1$ ponovo se rješava optimizacijski problem s ciljem pronalaska nove optimalne upravljačke sekvence uzimajući u obzir novo stanje sustava te pomicanje horizonta koji sad počinje u trenutku $k+1$.



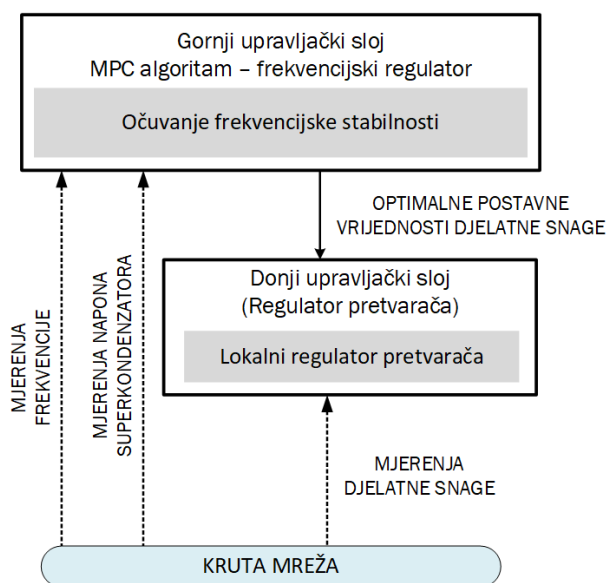
Slika 2.: Osnovni koncept modelskog prediktivnog upravljanja [9]

3.2. Upravljačka struktura

Predložena hijerarhijska upravljačka struktura primijenjena na superkondenzatora sastoji se od dva upravljačka sloja definirana kako slijedi:

- **gornji upravljački sloj** – regulator ovoga upravljačkog sloja računa optimalne postavne vrijednosti djelatne snage koje se prosljeđuju regulatoru donjeg upravljačkog sloja. Glavna svrha ovog upravljačkog sloja je pronalaženje odgovarajućeg rješenja za regulaciju frekvencije korištenjem superkondenzatora. (u ovom referatu se definira MPC algoritam za ovaj upravljački sloj)
- **donji upravljački sloj** – regulatori na razini pretvarača su odgovorni za slijeđenje postavnih vrijednosti snage primljenih iz gornjeg upravljačkog sloja (u ovom referatu se ne analizira ova razina upravljanja).

Na Slici 3. prikazana je predložena hijerarhijska struktura.



Slika 3.: Hijerarhijska struktura upravljanja

4. MPC ALGORITM GORNJEG UPRAVLJAČKOG SLOJA

4.1. Predikcijski model superkondenzatora

Predikcijski model superkondenzatora u formi prijenosne funkcije koja povezuje napon superkondenzatora V sa snagom punjenja/praznjenja P izražava se kao:

$$\frac{V(z)}{P(z)} = G(z) = \frac{a_3z + a_4}{z^2 + a_1z + a_2} \quad (7)$$

Vrijednosti koeficijenata $a_1 - a_4$ su identificirane izvodeći simulacije na nelinearnom simulacijskom modelu definiranom u (1)-(6). Nadalje, diskretni predikcijski model korišten unutar MPC regulatora izveden je koristeći poopćenu formulaciju CARIMA modela (engl. Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average) kako slijedi:

$$a(z)\Delta y_k = b(z)\Delta u_k \quad (8)$$

U jednadžbi (8) $a(z)$ i $b(z)$ su polinomi koji predstavljaju brojnik i nazivnik prijenosne funkcije. Ti polinomi se izražavaju kako slijedi:

$$a(z) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}, \quad a(z)\Delta = A(z) \quad (9)$$

$$b(z) = b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m} \quad (10)$$

gdje je Δ operator definiran kao $(1 - z^{-1})$. Budući da je estimacija poremećaja implicitno uključena unutar inkremenata ulaznih i izlaznih veličina ne postoji potreba za estimacijom poremećaja u sklopu predikcijskog modela.

Predikcija izlaznog napona superkondenzatora može se izračunati koristeći kompaktni matrični zapis kako slijedi:

$$V_{k+1,\rightarrow} = \mathbf{H}\Delta P_{k,\rightarrow} + \mathbf{K}\Delta P_{k-1,\leftarrow} + \mathbf{Q}V_{k,\leftarrow} \quad (11)$$

U jednadžbi (11) vektor $V_{k+1,\rightarrow}$ predstavlja predikciju napona superkondenzatora na duljini predikcijskog horizonta N , dok vektor $\Delta P_{k,\rightarrow}$ predstavlja upravljačku sekvencu u obliku inkremenata postavne vrijednosti djelatne snage pretvarača koji se koristi za integraciju superkondenzatora na mrežu. Ovi vektori su definirani kako slijedi:

$$V_{k+1,\rightarrow} = [V(k+1) \dots V(k+N)]^T \quad (12)$$

$$\Delta P_{k,\rightarrow} = [\Delta P(k) \dots \Delta P(k+N-1)]^T \quad (13)$$

Budući da je MPC formulacija u ovom referatu definirana tako da se inkrement upravljačkog signala, tj. inkrement postavne vrijednosti snage, računa u svakom vremenskom trenutku upravljački signal regulatora na osnovu inkrementa upravljačke veličine se računa kako slijedi:

$$P(k) = P(k-1) + \Delta P(k) \quad (14)$$

Zainteresirani čitatelj može pronaći detaljnu formulaciju matrica H , P , Q u literaturi [10].

4.2. Formulacija MPC problema

Funkcija cilja koja se minimizira u svakom vremenskom trenutku k definirana je kako slijedi:

$$J = [V_s \mathbf{1} - V_{k+1,\rightarrow}]^T \mathbf{Q}_y [V_s - V_{k+1,\rightarrow}] + \Delta P_{k,\rightarrow}^T \mathbf{Q}_u \Delta P_{k,\rightarrow} \quad (15)$$

U (15) $\mathbf{1}$ predstavlja vektor stupac od N jedinica, dok vektor V_s predstavlja referentu trajektoriju napona superkondenzatora koja se računa kao funkcija promjene frekvencije te je definirana kako slijedi:

$$V_s = \left(-\frac{1}{R} \delta f \right) + V_{s0} \quad (16)$$

U jednadžbi (16) V_{s0} predstavlja početnu vrijednost napona postavljenu na 1000 V, R je statičnost čija vrijednost je 1%, dok δf predstavlja odstupanje frekvencije. Nadalje, funkcija cilja definirana u (15) sastoji se od dva člana. Prvi član predstavlja pogrešku između referente trajektorije napona i predviđanja naponskog odziva superkondenzatora dok drugi član opisuje upravljački napor. Matrice Q_y i Q_u su dijagonalne matrice čije dimenzije odgovaraju duljini predikcijskog horizonta N te predstavljaju faktore penaliziranja jednog i drugog člana funkcije cilja. Nadalje, definirani optimizacijski algoritam uključuje i ograničenja upravljačke veličine, tj. postavne vrijednosti snage koja se šalje na pretvarač. Ograničenja uključena u sklopu optimizacijskog algoritma su definirana kako slijedi:

$$p^{min} \leq P \leq p^{max} \quad (17)$$

$$\Delta P^{min} \leq \Delta P \leq \Delta P^{max} \quad (18)$$

Ograničenje (17) predstavlja dopušteni raspon vrijednosti upravljačke veličine, dok ograničenje (18) definira dopuštenu brzinu promjene upravljačke veličine što je izuzetno bitno kod regulacije brzine odziva superkondenzatora prilikom regulacije frekvencije.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Efikasnost predloženog upravljačkog rješenja validirana je na nelinearnom simulacijskom modelu superkondenzatora. Kvaliteta gornjeg upravljačkog sloja baziranog na MPC algoritmu uspoređena je s odzivom klasičnog PID regulatora. Analizirana su dva simulacijska slučaja s različitim veličinama poremećaja. U prvom simulacijskom slučaju vrijednost poremećaja premašuje instalirani kapacitet superkondenzatora, dok je u drugom slučaju vrijednost poremećaja jednaka instaliranom kapacitetu superkondenzatora. Korištene postavke MPC i PID regulatora su definirane u Tablici 1.

Tablica 1. Postavke regulatora

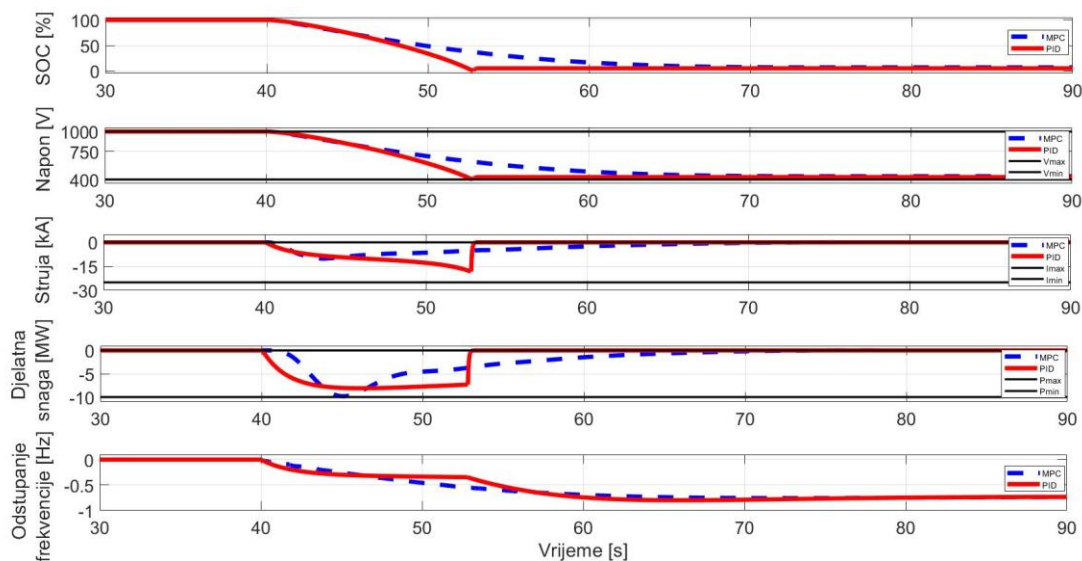
Regulator	Postavke	
PID	$K_d=20$	$K_i=150$
	$\tau_w^d=30$	$\tau_w^i=1$
MPC	$N = 50$	
	$p^{max}=10$ MW	$p^{min}=0$ MW
	$\Delta p^{max}=0,1$ MW	$\Delta p^{min}=0,1$ MW
	$v^{max}=1000$ V	$v^{min}=400$ V
	$q_y=1000$	$q_u=150$

Glavni parametri MPC regulatora su duljina predikcijskog horizonta N te vrijednosti faktora penaliziranja q_y i q_u . Ograničenja su definirana na osnovu ograničenja sustava u simulacijskom postavu. Naime, maksimalna dopuštena vrijednost napona superkondenzatora je 1000 V kada je u potpunosti napunjen, dok je minimalna vrijednost napona superkondenzatora 400 V kada je prazan. Nadalje, u obzir su uzeta i ograničenja upravljačkog signala zbog fizičkih ograničenja pretvarača koji povezuje superkondenzator na mrežu. Ovdje treba istaknuti da je nazivna snaga superkondenzatora 10 MW kao i snaga samog pretvarača koji ga povezuje na EES. Nadalje u simulaciji je u obzir uzeta bazna snaga EES-a od 400 MVA.

5.1. Simulacijski slučaj 1

U trenutku $t=40$ s došlo je do poremećaja od 15 MW koji je uzrokovao propad frekvencije. Rezultati su prikazani na Slici 4. Moguće je primijetiti da odzivi korištenjem oba tipa regulatora zadovoljavaju fizička ograničenja u smislu maksimalne i minimalne dopuštene vrijednosti napona superkondenzatora te strujnog ograničenja, odnosno snage pretvarača. Naime, u oba slučaja nakon što se superkondenzator isprazni napon se ustali na vrijednosti oko 440 V, dok ograničenje snage pretvarača od 10 MW također nije narušeno. Odziv superkondenzatora u slučaju korištenja klasičnog PID regulatora u usporedbi s MPC-om stvara mnogo brži odziv te se superkondenzator u potpunosti isprazni u trenutku $t=52$ s, dok se u slučaju korištenja MPC-a superkondenzator isprazni u trenutku $t=69$ s. Na prvi pogled u kontekstu regulacije frekvencije može izgledati poželjno da se superkondenzator čim prije isprazni sa skoro konstantnom snagom pražnjenja kao što je u slučaju s korištenjem PID regulatora. Međutim, problem kod ovakvog načina pražnjenja superkondenzatora je što u trenutku kada se on isprazni, tj. kada je dosegao minimalni dozvoljeni napon, dolazi do skokovitog propada njegove snage. Ovaj efekt je vidljiv na Slici 4. u trenutku $t=52$ s kada dolazi do dodatnog propada frekvencije. Iako u oba slučaja regulatori stabiliziraju frekvenciju na 49.3 Hz u slučaju PID regulatora frekvencije je u jednom trenutku dosegla vrijednost od 49.2 Hz što nije bio slučaj kod MPC-a. Glavni razlog za to je taj što MPC uzima u obzir ograničenja brzine promjene upravljačke veličine, tj. postavne vrijednosti djelatne snage, što dovodi do postepenog smanjenja snage superkondenzatora. Nadalje, dodatni problem kod naglog smanjenja snage, odnosno struje, je taj što uzrokuje prenapon na samom pretvaraču zbog induktivnih elemenata.

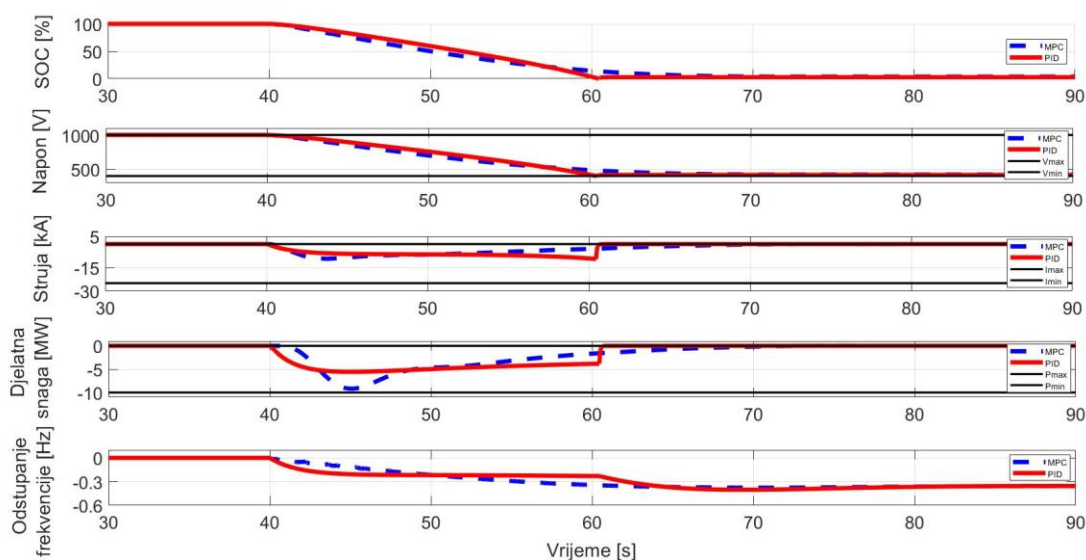
Dakle glavna prednost u korištenju predloženog MPC regulatora je da su ograničenja sustava integrirana u upravljački algoritam tijekom projektiranja samog regulatora, dok se u slučaju PID regulatora ta ograničenja uvode kao limiti na vrijednost upravljačkog signala pritom ne uzimajući u obzir trenutnu radnu točku.



Slika 4.: Simulacijski slučaj 1 – vrijednost poremećaja veća od kapaciteta superkondenzatora

5.2. Simulacijski slučaj 2

U trenutku $t=40$ s došlo je do poremećaja od 10 MW koji je uzrokovao propad frekvencije. Rezultati su prikazani na Slici 5. Moguće je primijetiti da odzivi korištenjem oba tipa regulatora zadovoljavaju fizička ograničenja u smislu maksimalne i minimalne dopuštene vrijednosti napona superkondenzatora te strujnog ograničenja, odnosno snage pretvarača. Naime, u oba slučaja nakon što se superkondenzator isprazni napon se ustali na vrijednosti oko 435 V, dok ograničenje snage pretvarača od 10 MW također nije narušeno. Iako je u prvom simulacijskom slučaju amplituda struje dosegla 19 kA korištenjem PID regulatora u ovom slučaju amplituda struje je dosegla vrijednost od 9 kA. Nadalje, u slučaju korištenja MPC-a amplituda je ograničena na 10 kA. U ovom simulacijskom slučaju niže vrijednosti struja su i očekivane budući da je manja vrijednost poremećaja. Odziv superkondenzatora u slučaju korištenja klasičnog PID regulatora u usporedbi s MPC-om stvara mnogo brži odziv te se superkondenzator u potpunosti isprazni u trenutku $t=61$ s, dok se u slučaju korištenja MPC-a superkondenzator isprazni u trenutku $t=72$ s. I u ovom simulacijskom slučaju pokazano je da MPC sprečava pojavu negativnog efekta dodatnog propada frekvencije uzrokovanog naglim propadom snage superkondenzatora. U slučaju korištenja PID regulatora negativni efekt propada snage je vidljiv u trenutku $t=61$ s kada snaga, odnosno struja gotovo trenutno propadnu na nulu.



Slika 5.: Simulacijski slučaj 2 – vrijednost poremećaja jednaka kapacitetu superkondenzatora

6. ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovoga referata bio je pokazati potencijalne prednosti primjene MPC algoritma u regulaciji frekvencije korištenjem superkondenzatora. Primijenjeni MPC algoritam zasnovan je na linearnom predikacijskom modelu superkondenzatora, dok je nelinearni simulacijski model korišten u svrhu validacije samog algoritma. Nadalje, u cilju potvrde potencijala predloženog rješenja, provedena je usporedna analiza između klasičnog PID i predloženog MPC regulatora za različite veličine poremećaja. Glavni zaključak je da se korištenjem MPC-a osigurava sporije smanjenje snage superkondenzatora te unapređuje frekvencijski odziv sustava, budući da MPC uzima u obzir brzinu promjene upravljačkog signala, tj. postavne vrijednosti snage pražnjenja superkondenzatora. U tom smislu, dodatni propad snage koji je karakterističan prilikom korištenja PID regulatora je izbjegnuto u ovom slučaju.

7. ZAHVALA

Ovo istraživanje provedeno je u sklopu projekta **Fleksibilnost mikromreža s visokim udjelom pretvarača - FLEXIBASE** koji je financiran od strane Hrvatske zaklade za znanost (HRZZ-a) pod ugovorom PZS-2019-02-7747.

LITERATURA

- [1] F. Milano, F. Dorfler i ostali: Foundations and challenges of low-inertia systems, Power System Computation Conference (PSCC 2018), Dublin, stranice od 1-25, lipanj 2018
- [2] P. Kundur : *Power System stability and control*, McGraw-Hill, 1994.
- [3] S. Buller, E. Karden i ostali: Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no 6. , stranice 1622-1626, studeni 2002.
- [4] R. Faranda, M. Gallina, i ostali: A new simplified model of double-layer capacitors, 2007 International Conference on Clean Electrical Power, svibanj 2007, stranice. 706–710.
- [5] V. Musolino, L. Piegari, i ostali: New full-frequency-range supercapacitor model with easy identification procedure, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, stranice 112–120, siječanj 2013.
- [6] J. M. Maciejowski: *Predictive control: with constraints*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [7] E. F. Camacho, C. Bordons: *Model Predictive control*, New York: Springer-Verlang, 1999
- [8] L. Wang: *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, Springer, 2009.
- [9] D. Seborg, T. Edgar i ostali: *Process Dynamics and Control*, 2011.
- [10] J.A. Rossiter: *A First Course in Predictive Control*, Taylor and Francis Group, Second Edition, 2018.