

РХЕ: ПРОРАЧУНИ КРАТКИХ СПОЈЕВА – ЕВРОПСКА ПРАКСА И ПРИМЕНА**PSPP: SHORT CIRCUIT CALCULATION – EUROPEAN PRACTICE AND APPLICATION**

Стефан Радовић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – Припрема прикључења реверзибилне хидроелектране (РХЕ) у електроенергетски систем (ЕЕС), уз поштовање европских пракси и норми, представља основну тему овог рада. У ту сврху, за разне режиме рада РХЕ, анализирани су вредности струје кратког споја и расподеле напона. На основу добијених резултата, одабрана је адекватна заштитна и прекидачка опрема уз пропратну дискусију.

Кључне речи: Реверзибилна хидроелектрана, електроенергетски систем, прорачун кратких спојева

Abstract – Preparation of the connection of a pumped storage power plant (PSPP) to the power system, while respecting European practices and standards, is the main topic of this paper. For this purpose, the values of short-circuit current and voltage distribution were analyzed for various PSPP operating modes. Based on the results obtained, adequate protective and switching equipment was selected, along with an accompanying discussion.

Keywords: Pumped storage power plant, power system, short circuit calculation

1. УВОД

Реверзибилна хидроелектрана (РХЕ) је значајан ресурс за балансирање енергије електроенергетских система (ЕЕС), посебно у комбинацији са обновљивим изворима енергије. РХЕ омогућава складиштење вишка енергије у периодима ниске потрошње и њено ослобађање у периодима вршног оптерећења, чиме побољшава стабилност фреквенције и вредности напона [1].

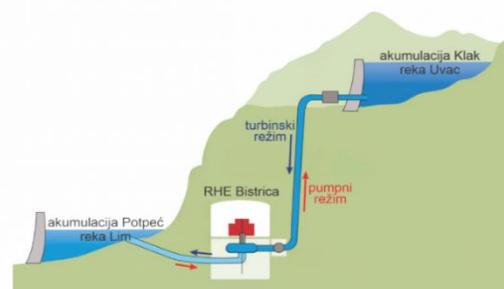
У Европској унији постоји више успешних примера интеграције РХЕ у преносне мреже, где су примењени различити режими рада, методе регулације и заштита система [2]. Анализа ових искустава пружа драгоцене смернице за планирање и оптимизацију прикључења нових РХЕ на ЕЕС.

У ту сврху разматра се реална РХЕ, која треба да се интегрише у ЕЕС, преко 400 и 220 kV далековода и трансформаторске станице 400/220/18kV. Њена укупна апроксимативна инсталисана снага је око 640 MW (са четири генератора појединачне снаге приближно 160 MW). Генератори су предвиђени да раде као

реверзибилне Францис турбине са асинхроно-синхроним моторима-генераторима. Висински пад између горње и доње акумулације је 60 m, што обезбеђује погодне услове за овакав тип постројења. Разматрају се два основна режима рада:

1. Генераторски режим – производња електричне енергије у периодима вршног оптерећења.
2. Пумпни режим – акумулација вишка енергије у периодима ниске потрошње.

У оба режима, РХЕ ће доприносити стабилности фреквенције и напонског профила ЕЕС. Посебна пажња посвећена је управљању излазном снагом, да би се избегле нагле флукуације које могу изазвати проблеме у мрежи.



Слика 1. Приказ РХЕ са горњом и доњом акумулацијом

2. ПРЕГЛЕД ЕВРОПСКИХ ПРАКСИ

Неки од примера европских пракси су:

Аустрија – Капрун и Малта: Аустријске РХЕ, попут постројења у Капруну, користе пумпно-турбински режим рада да би складиштиле вишак енергије и ослобађале је током вршних оптерећења. Систем омогућава брзо пребацивање између режима рада и доприноси секундарној и терцијарној регулацији.

Швајцарска – Linthal и Nant de Drance: Швајцарске РХЕ су интегрисане у планирање и често раде у комбинацији са регулационим центрима који управљају фреквенцијом и напонским профилима. Linthal и Nant de Drance користе велике акумулације и вишестепене турбинске системе, што омогућава ефикасну реакцију на промене оптерећења у преносом систему

Немачка – Goldisthal и Markerbach: Немачке РХЕ су интегрисане са ЕЕС тако да активно учествују у стабилизацији мреже током променљивих производних капацитета из ветро и солар електрана. Управљање пумпно-турбинским режимом омогућава брзо повећање или смањење снаге у ЕЕС.

НАПОМЕНА:

Овај рад је пристоко из мастер рада чији је ментор проф. др Горан Швенда.

Закључци из европских искустава [3] су:

- РХЕ треба да буде флексибилно повезана са мрежом, са могућношћу брзог пребацивања режима рада.
- Планирање прикључења мора укључити анализу напонских профила, струје кратког споја и заштитних система.
- Коришћење стандарда IEC 60909 и детаљна симулација динамике мреже су неопходни за безбедну интеграцију.
- Интеграција РХЕ доприноси не само производњи вршне енергије већ и секундарној резерви, стабилизацији фреквенције и напонској подршци.
- Ове смернице и искуства представљају основу за планирање прикључења РХЕ на ЕЕС, са циљем да се електрани максимизира допринос сигурности и поузданости мреже.

3. АНАЛИЗА УТИЦАЈА НА НАПОНЕ И СТРУЈЕ КРАТКОГ СПОЈА

3.1. Анализа утицаја на струје кратког споја

Интеграција РХЕ у ЕЕС захтева анализу утицаја струја кратког споја и напона у тачки прикључења и околним чворовима. На основу искуства из европске праксе:

- Прикључење РХЕ повећава струју кратког споја у непосредној близини електране, што захтева одговарајућу прекидачку и заштитну опрему.
- Удаљени чворови преносне мреже су обично погођени минимално, под условом правилног димензионисања трансформаторских станица и далековода.
- Управљање РХЕ помоћу аутоматизованих контролних система смањује ризик од дестабилизације ЕЕС.

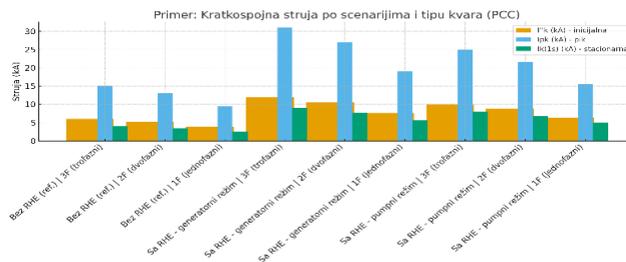
Анализа утицаја на струју кратког споја представља кључни део студија прикључења великих производних електрана на ЕЕС. Циљ ових прорачуна је да се одреде максималне и минималне вредности струја квара у тачки прикључења, као и њихов утицај на околне чворове и опрему. На основу добијених резултата доносе се закључци о потребним мерама заштите, избору прекидачке опреме и поузданости рада ЕЕС у хаваријским стањима.

За потребе овог рада коришћена је методологија дефинисана у међународном стандарду IEC 60909 - Short-Circuit Currents in Three-Phase a.c. Systems [4]. Стандард омогућава прорачун симетричних и асиметричних кратких спојева. Прорачун је спроведен за следеће типове кратких спојева:

- Трофазни симетрични квар (3Ф) – квар који највише напреже прекидачку и заштитну опрему.
- Двофазни кратак спој (2Ф) – значајан због могућег асиметричног режима у ЕЕС.
- Једнофазни кратак спој (1Ф) – најчешћи тип квара у ЕЕС.

Прорачун струја кратког споја је урађен за различите сценарије:

1. Рад без прикључења РХЕ (референтно стање).
2. Рад са прикљученом РХЕ у генераторском режиму.
3. Рад са прикљученом РХЕ у пумпном режиму.



Слика 2. Поређење иницијалне $I''k$, вршне ударне I_{pk} и стационарне $I_k(1s)$ струје по сценаријима и типу кратког споја (без РХЕ, са РХЕ у режиму генератора, са РХЕ у пумпном режиму)

Scenario	Tip kvara	$I''k$ (kA) - inicijal	I_{pk} (kA) - pik	I_k (kA) - stacionarna
Bez RHE (ref.) 3F (trofazni)	3F (trofazni)	6	15	4
Bez RHE (ref.) 2F (dvofazni)	2F (dvofazni)	5,2	13	3,5
Bez RHE (ref.) 1F (jednofaz)	1F (jednofaz)	3,8	9,5	2,6
Sa RHE - gen. 3F (trofazni)	3F (trofazni)	12	31	9
Sa RHE - gen. 2F (dvofazni)	2F (dvofazni)	10,5	27	7,8
Sa RHE - gen. 1F (jednofaz)	1F (jednofaz)	7,6	19	5,6
Sa RHE - pum. 3F (trofazni)	3F (trofazni)	10	25	8
Sa RHE - pum. 2F (dvofazni)	2F (dvofazni)	8,8	21,5	6,8
Sa RHE - pum. 1F (jednofaz)	1F (jednofaz)	6,4	15,5	4,9

Слика 3. Табеларни приказ вредности иницијалне симетричне краткоспојне струје $I''k$, вршне ударне струје I_{pk} и стационарне вредности струје на $1s$ (I_k) за три типа кратког споја

На овај начин могуће је сагледати утицај електране на промену вредности струје кратког споја у тачки прикључења, али и у околним чвориштима. Резултат прорачуна кратког споја показује да прикључење РХЕ значајно утиче на нивое струја кратког споја у ЕЕС. У генераторском режиму рада, вредности струја кратког споја су скоро двоструко веће у односу на референтни случај без РХЕ (у пумпном режиму оне, такође, расту, али нешто мање). Највеће вредности, очекивано, се јављају при трофазном кратком споју, док су најмање за једнофазне кратке спојеве.

3.2. Избор адекватне прекидачке и заштитне опреме

1) На основу израчунатих вредности струја кратког споја, $I''k$, I_{pk} и $I_k(1s)$ следи да:

- називна прекидна моћ прекидача мора бити \geq од највеће израчунате иницијалне симетричне компоненте струје у тачки прикључења,
- динамичка издржљивост (механичка, да издржи ударну струју) мора бити \geq вршне ударне струје I_{pk} ,
- термичка издржљивост (1s), мора бити $\geq I_k(1s)$.

То значи да треба да се користи 110kV SF6 прекидач са називном прекидном способношћу мин. 31,5kA (1s) и вршном издржљивошћу 63 kA.

2) Заштитна опрема

Струјни трансформатори CTs морају бити димензионисани да мере у класи тачности и при

струјама кратког споја (класе 5P20, 10P20 за заштиту). Одабир примарних вредности СТ (нпр. 600/1 А, 800/1 А) се ради према струјама оптерећења (изабране вредности су опсегу од 50% до 120% називне струје штићеног објекта), а гранични фактор тачности (у овом случају 20) се бира тако да не дође до засићења при највећим струјама кратког споја.

Одводници пренапона (пренапонска заштита) се бира према називном напону система (110kV).

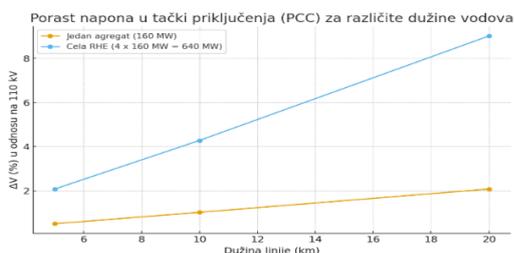
Релејна заштита: Диференцијална заштита генератора и трансформатора, прекострујна и земљоспојна заштита морају бити подешене на основу нових нивоа кратког споја.

3.3. Анализа напонских прилика

Урађен је прорачун и анализа напонских прилика за пример: агрегат 160 MW, PF=0.95lag, прикључење на 110kV. Коришћени су поједностављени једнолинијски модели (мрежа референтни „infinite bus“ на 110kV и типични параметри водова. Коришћени су следећи подаци у прорачуну: фактор снаге PF=cosα=0.95 (инд.); привидна снага S=P/cosα= 168.42 [MVA]; напонски ниво прикључења U_{LL}=110 [kV]; струја (магнитуда), $I = \frac{S}{U_{LL}} = 884$ [A]; линијски параметри (претпоставка, типичне вредности за средње удаљености): R' = 0.05 Ω/km; X' = 0.25 Ω/km; референтна мрежа је узета као 110kV, 0°.

Scenario	Дужина линије (km)	R (Ω)	X (Ω)	I (A)	V _{pcc} (V)	ΔV (%)
Jedan agregat	5	0,25	1,25	884	110559,3	0,508
Jedan agregat	10	0,5	2,5	884	111127,3	1,025
Jedan agregat	20	1	5	884	112288,4	2,08
Cela RHE (4 x)	5	0,25	1,25	3535,9	112288,4	2,08
Cela RHE (4 x)	10	0,5	2,5	3535,9	114708,4	4,28
Cela RHE (4 x)	20	1	5	3535,9	119910,7	9,01

Слика 4. Вредности струје и напона за наведене сценарије и дужине водова



Слика 5. Пораст напона у тачки прикључења

Промене напона, за један агрегат (160 MW), су релативно мале (<~1% за вод до 10 km). Међутим, ако се прикључе четири агрегата (640 MW), на већој удаљености, пораст напона може достићи и премашити техничке границе.

Зашто се напон мења: Када агрегат испоручује активну снагу у мрежу, изворна струја тече кроз серијску импедансу водова и производи пад/пораст напона $\Delta V = Z_l \cdot I$, што мења напон у тачки прикључења. Ако је ΔV близу или изнад дозвољених граница, треба размотрити техничка решења. Повећане вредности

напона утичу и на рад заштите, трансформатора и макс./мин. вредности за опрему.

4. ЗАКЉУЧАК

РХЕ са значајним капацитетом за акумулацију и балансирање, игра кључну улогу у ублажавању флукуације које су узроковане обновљивим изворима енергије. Прикључење РХЕ има позитиван ефекат на флексибилност и сигурност снабдевања, али доводи до повећања струја кратког споја и пораста напона у тачки прикључења. Зато се интеграција РХЕ посматра целовито, енергетски и са аспекта стабилности и заштите ЕЕС.

Анализа европских пракси показује да флексибилно управљање режимом рада и аутоматски контролисани излаз снаге значајно смањује ризик од дестабилизације ЕЕС.

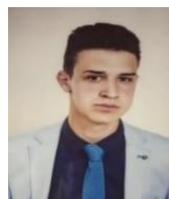
Са аспекта кратких спојева, прикључење генератора доводи до повећања иницијалне и ударне вредности струје у тачки прикључења, нарочито у генераторском режиму. Док би вредности у референтном стању биле у границама капацитета постојеће опреме, прикључење РХЕ може захтевати додатну проверу прекидне моћи прекидача, као и координацију релејне заштите.

Са аспекта напонских прилика, резултати показују да један генератор од 160 MW практично не угрожава напоне система – промена напона у тачки прикључења су у границама +1%. Међутим, при раду целе електране (640 MW) промене постају израженије и достижу +4% на удаљености 10 km, односно +9% (прелазе дозвољене границе) на раздаљини 20 km. Ово показује да интеграција великих снага у мрежу нижег напонског нивоа (110 kV) може изазвати неприхватљиве порасте напона.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] International Energy Agency (IEA) – Pumped Storage Hydropower – A key Enabler for Renewable Energy Integration, IEA Report, Paris 2022.
- [2] ENTSO-E, Hydro Power and Pumped Storage in the European Power System, Brussels, 2021.
- [3] European Commission: The Role of Energy Storage in the EU Power System, Technical Report, 2020.
- [4] IEC 60909-0: Short-Circuit Currents in Three-Phase a.c. Systems – Part 0: Calculation of Currents, International Electrotechnical Commission, Geneva, 2016.

Кратка биографија:



Стефан Радовић је рођен у Новом Пазару 1999. године. Основне студије уписао на ФТН-у 2018. године из области Електротехника и рачунарство, и завршио 2023.године. Исте године уписао мастер студије на ФТН у Новом Саду – смер Дистрибуирани енергетски ресурси. Тренутно запослен у АД ЕМС, Београд.