



OBRTNE ELEKTRIČNE MAŠINE U SAVREMENOM ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

PROF. DR GOJKO JOKSIMOVIĆ

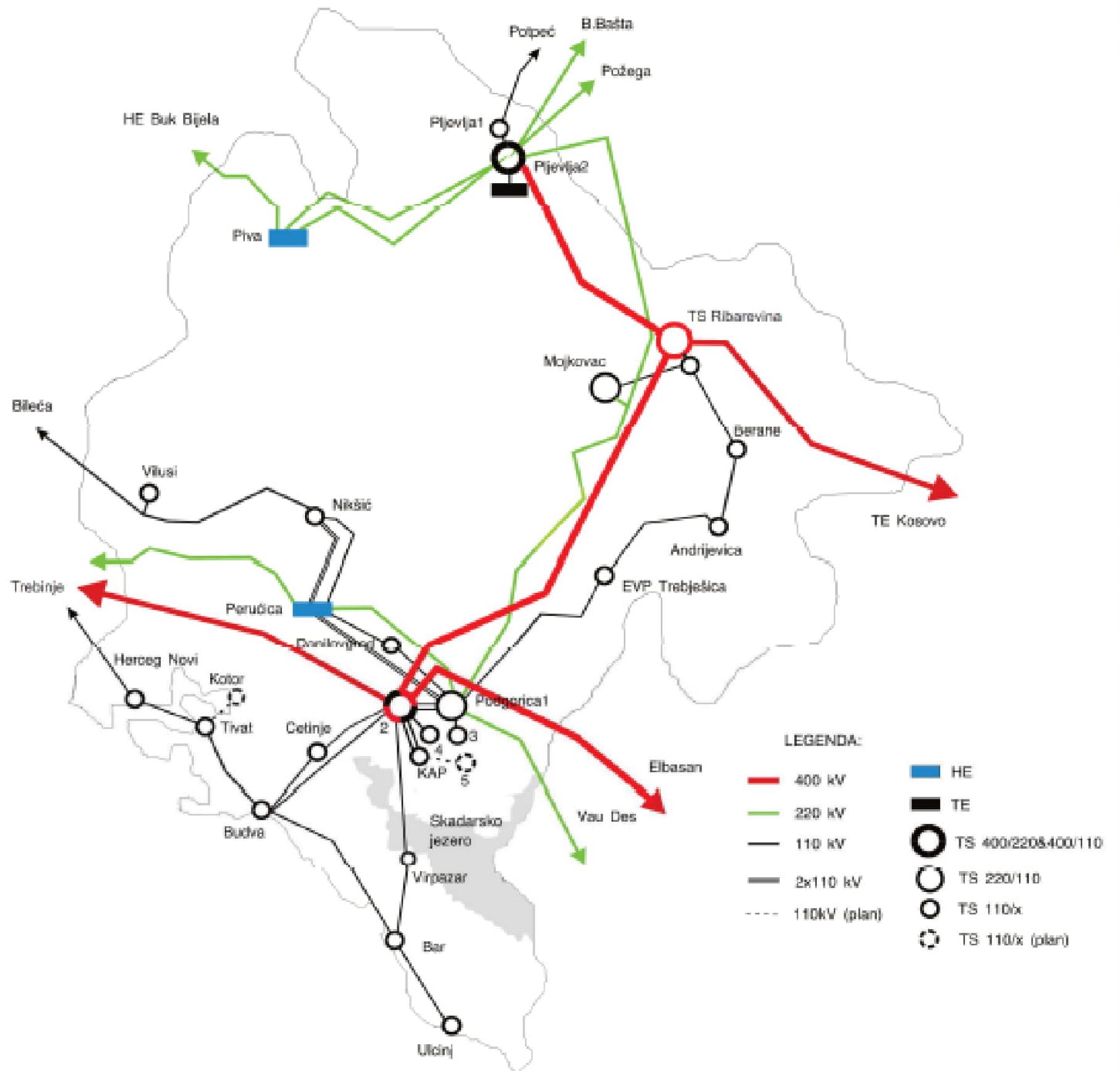
UVOD

- KONVENCIONALNI ELEKTROENERGETSKI SISTEM (EES)
- NOVI KONCEPT ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA
- DISTRIBUIRANI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE
- GENERATORI U MALIM HIDROELEKTRANAMA
- SINHRONI GENERATOR U VJETROAGREGATIMA
- ASINHRONI GENERATOR U VJETROAGREGATIMA
- DVOSTRANO NAPAJANI ASINHRONI GENERATOR U VJETROAGREGATIMA
- ZAKLJUČAK

„KLASIČNI“ ELEKTROENERGETSKI SISTEM

- EES je sistem čija je osnovna funkcija napajanje potrošača električnom energijom
- Čine ga izvori električne energije, električna mreža i potrošači električne energije
- Električna mreža je sistem električnih vodova koji čine vezu između električnih izvora i potrošača
- Izvori električne energije su konvencionalni izvori – sinhroni generatori velikih snaga

EES CRNE GORE



EES CRNE GORE

TE Pljevlja – jedan sinhroni
turbogenerator snage
257MVA (218.5 MW),
15.75kV

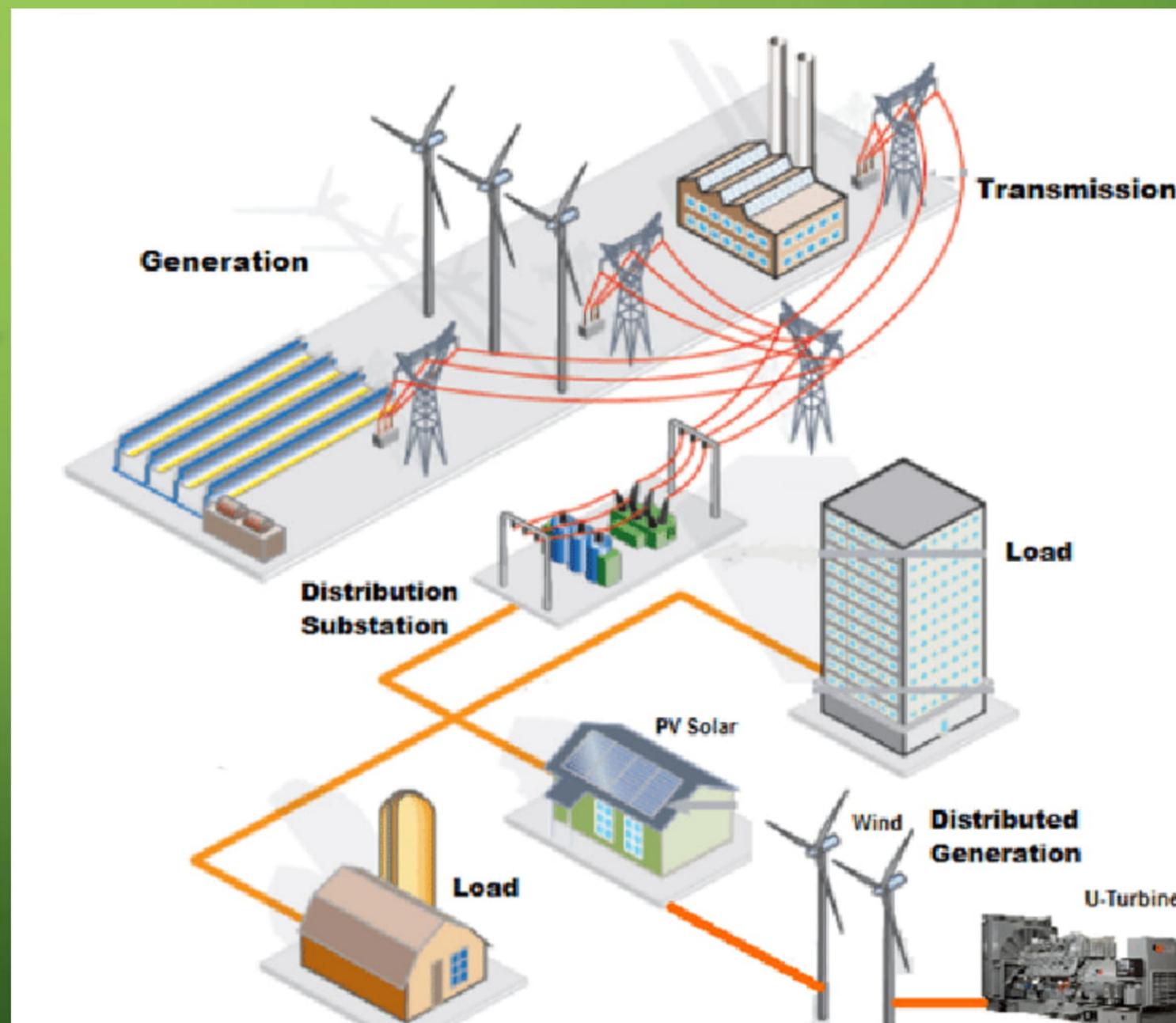
HE Perućica – pet
hidrogeneratora
snage po 40MVA (38MW) i
dva generatora snage po
65MVA (58.5MW)
10.5kV

HE Piva – tri hidrogenatora
snage po 120 MVA
(114MW)
15.75kV

**Ukupna instalisana snaga:
950 MVA (870 MW)**

NOVI KONCEPT ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

- Osnovna karakteristika novog EES jeste pojava većeg broja izvora električne energije manjih snaga priključenih u srazmjerno više tačaka električne mreže – **distribuirani izvori električne energije**
- Male hidroelektrane
- Vjetrogeneratori
- Solarne elektrane
- Elektrane na biomasu



PAMETNE ELEKTRIČNE MREŽE

- U okviru današnje, savremene elektroenergetike, sve češće je u upotrebi pojam **smart grids** – pametne električne mreže
- Kakve su to mreže?
- Pojam smart grids označava novu koncepciju električne mreže koju dominantno karakterišu distribuirani izvori električne energije
- Uloga elemenata električne mreže nije nepromjenljiva
- Jedan element mreže se nekada ponaša kao potrošač a nekada kao izvor – proizvođač električne energije
- Ovu mrežu karakteriše značajan udio uređaja energetske elektronike

POTROŠAČ – IZVOR ELEKTRIČNE ENERGIJE (1)

- Ranije su elektrane generisale električnu energiju, ona se prenosila putem električnih vodova do prijemnika – potrošača električne energije
- Potrošači su industrijska postrojenja, gradska rasvjeta, domaćinstva itd.
- Kako danas domaćinstvo može da bude opremljeno i solarnim panelima (**PV panels: photo-voltaic panels**) koji transformišu energiju sunčevog zračenja u električnu energiju (DC), to domaćinstvo koje je nekad bilo isključivo potrošač električne energije sada može i da generiše električnu energiju



POTROŠAČ – IZVOR ELEKTRIČNE ENERGIJE (2)

- Domaćinstvo može da u svom sklopu ima i mali vjetrogenerator (**wind turbine**) koji transformiše kinetičku energiju vjetra u električnu energiju;
- U slučajevima kada njegova proizvodnja nadmašuje potrebe domaćinstva, ta se energija može isporučivati (prodavati) električnoj mreži



PAMETNO ELEKTRIČNO BROJILO (1)

- Očigledna je potreba i za postojanjem pametnog električnog brojila (**smart electric meter**) koje neće očitavati samo utrošenu električnu energiju kao ranije već i električnu energiju predatu elektroenergetskom sistemu (EES)



PAMETNO ELEKTRIČNO BROJILO (2)

- To je, naravno, samo jedna od mogućnosti koje pruža pametno električno brojilo;
- Pametno električno brojilo ima i brojne druge funkcije koje se ogledaju, prije svega, u mogućnosti ostvarivanja dvosmjerne komunikacije između prijemnika i operatora (distributera) električne mreže



DISTRIBUIRANI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE (1)

- U prethodna dva slajda je bio analiziran slučaj jednog domaćinstva koje sada može imati dvostruku ulogu: potrošača i malog proizvođača električne energije
- Koncept je, međutim, mnogo širi i podvodi se pod pojam **distribuirani izvori električne energije** kako je to ranije konstatovano
- Pored klasičnih, velikih, konvencionalnih izvora električne energije (termoelektrane, hidroelektrane, nuklearne elektrane) javlja se i značajan broj distribuiranih izvora električne energije manjih snaga
- Primjer su male hidroelektrane, vjetroparkovi, solarne elektrane, elektrane na biomasu

DISTRIBUIRANI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE (2)

- Prethodno rečeno jasno ilustruje uvođenje u savremeni EES mnogo stohastičkih varijabli
- Vjetra ima ili nema, duva manjom ili većom snagom (brzinom)
- Sunca „ima“ ili „nema“, kada naiđu oblaci ili tokom noći
- Vode za rad malih hidroelektrana nekada ima a nekada nema ili je ima u manjim ili većim količinama
- Kako je električna energija specifična u smislu da je nije moguće skladištiti, u svakom trenutku u EES mora da postoji balans između električne energije koja se generiše i koja se troši
- Odstupanje od pomenutog balansa dovodi do poremećaja u kvalitetu električne energije koji se ogleda dominantno u njenoj učestanosti (50Hz)

DISTRIBUIRANI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE (3)

- Upravljanje EES postaje vrlo složeno
- Primjer: sistemi sa značajnim udjelom vjetrogeneratora pri jakim vjetrovima moraju brzo smanjivati količinu električne energije proizvedenu u drugim elektranama
- Kod hidroelektrana je to moguće
- Kod termoelektrana je to nemoguć zahtjev zbog njihove ogromne inercije u toplotnom smislu
- Stabilnost EES je takođe smanjena u odnosu na raniji, konvencionalni EES
- Jedan od bitnih razloga smanjene stabilnosti je smanjena inercija EES koja je ranije uglavnom bila definisana ogromnim rotacionim masama u sinhronim generatorima
- Sinhroni kompenzatori na taj način dobijaju na značaju u savremenom EES
- Sve u svemu, savremeni EES postao je mnogo zahtjevniji u odnosu na konvencionalni

GDJE SU TU OBRTNE ELEKTRIČNE MAŠINE?

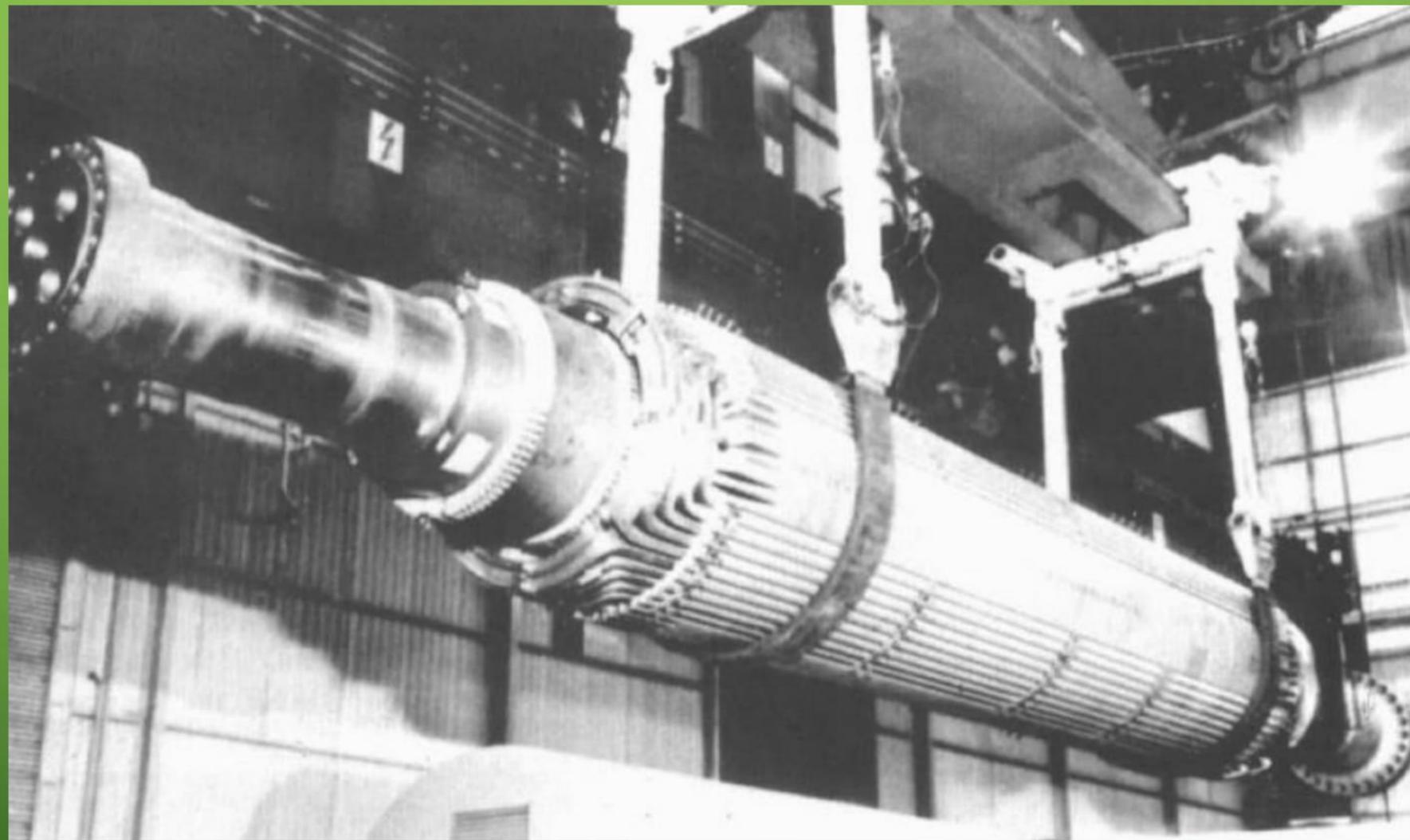
- One su prije svega u malim hidroelektranama i vjetroagregatima u ulozi generatora
- Takođe su tu u ulozi sinhronog kompenzatora
- U klasičnom EES osnovni izvor električne energije bio je sinhroni generator
- To su električne mašine ogromih snaga - reda veličine stotina MW
- Sinhroni turbo-generatori i sinhroni hidro-generatori
- Konstruktivno su prilagođeni karakteristikama turbine koja je pogoni
- Međutim, osnovni princip rada je isti
- Pobuda je klasična - pobudni namotaj
- Rotor rotira stalnom, vrlo precizno kontrolisanom brzinom u zavisnosti od broja polova

SINHRONI HIDROGENERATOR



Sinhroni hidrogenerator, 120 MVA, $\cos\varphi=0.95$, 15.75 kV,
50 Hz, 250 obr/min ($p=12$), HE „Piva“

SINHRONI TURBOGENERATOR



Rotor sinhronog turbogeneratora: 204 tone, dužina vazdušnog procjepa 120mm, pobudna struja 11.2 kA

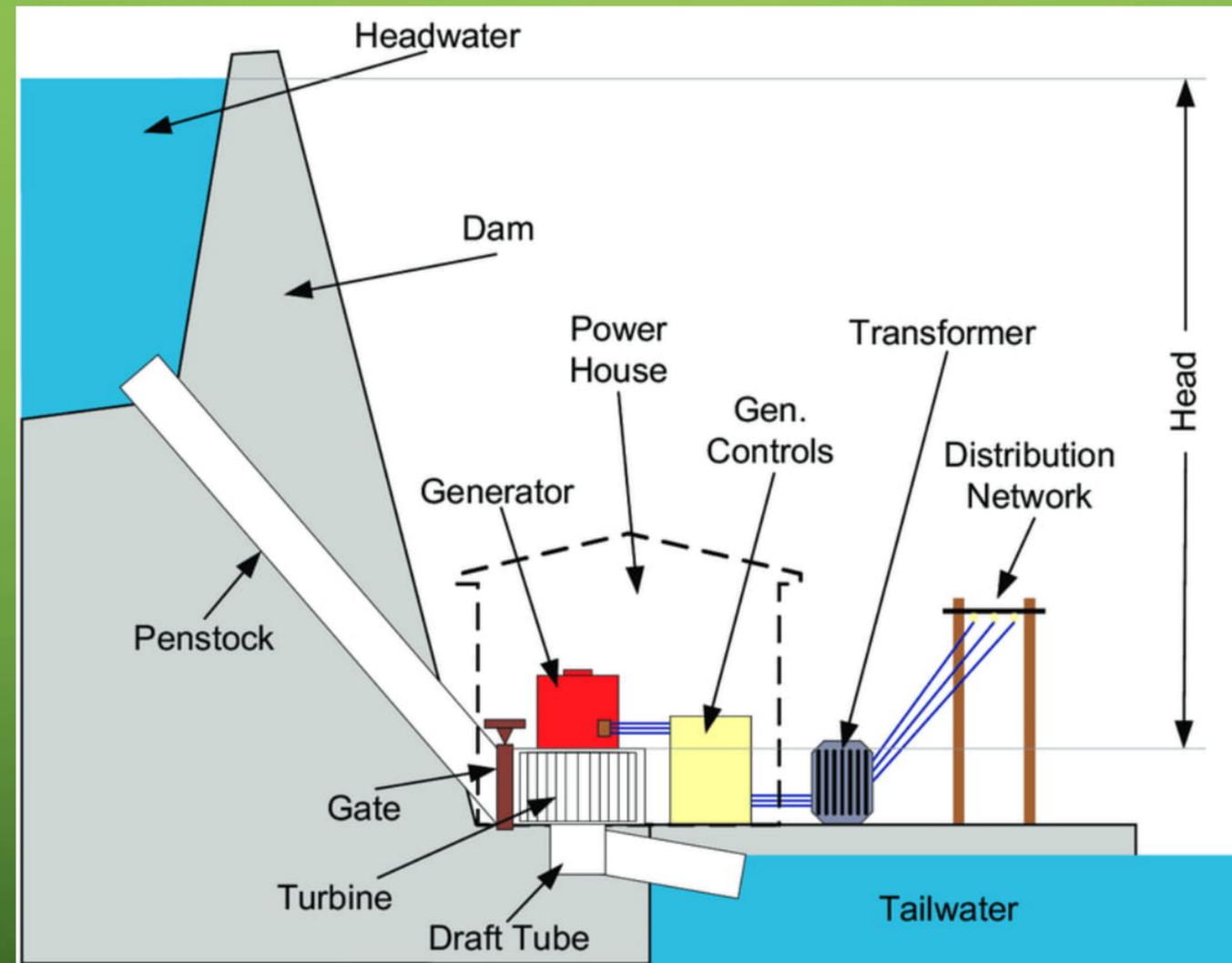
SINHRONI KOMPENZATOR

- Sinhroni kompenzator se uslovno može smatrati generatorom, ali generatorom reaktivne energije
- U suštini, radi se o sinhronom motoru koji radi neopterećen
- Podešavanjem pobude definiše se količina reaktivne snage koja se isporučuje električnoj mreži
- U klasičnom EES osnovna mu je uloga poboljšanje naponskih prilika u sistemu (poboljšanje faktora snage – smanjivanje struje u vodovima)
- U savremeno koncipiranom EES ima dodatno značajnu ulogu
- Njegovim angažovanjem raste inercija sistema zahvaljujući njegovoj obrtnoj masi – poboljšava se stabilnost EES

MALE HIDROELEKTRANE

- U zavisnosti od snage, u malim hidroelektranama su u upotrebi ili klasični sinhroni generatori ili asinhroni generatori sa kaveznim rotorom
- Klasični sinhroni hidrogenerator sa rotorom sa istaknutim polovima u malim hidroelektranama većih snaga – par MW
- Klasična pobuda – pobudni namotaj sa jednosmjernom strujom
- U elektranama malih snaga su u upotrebi asinhroni generatori sa kaveznim rotorom
- Njihova prednost je konstanta učestanost ukoliko su vezani na krutu električnu mrežu
- Brzina rotora (iznad sinhronne brzine) definiše izlaznu snagu
- Reaktivnu snagu preuzimaju iz mreže

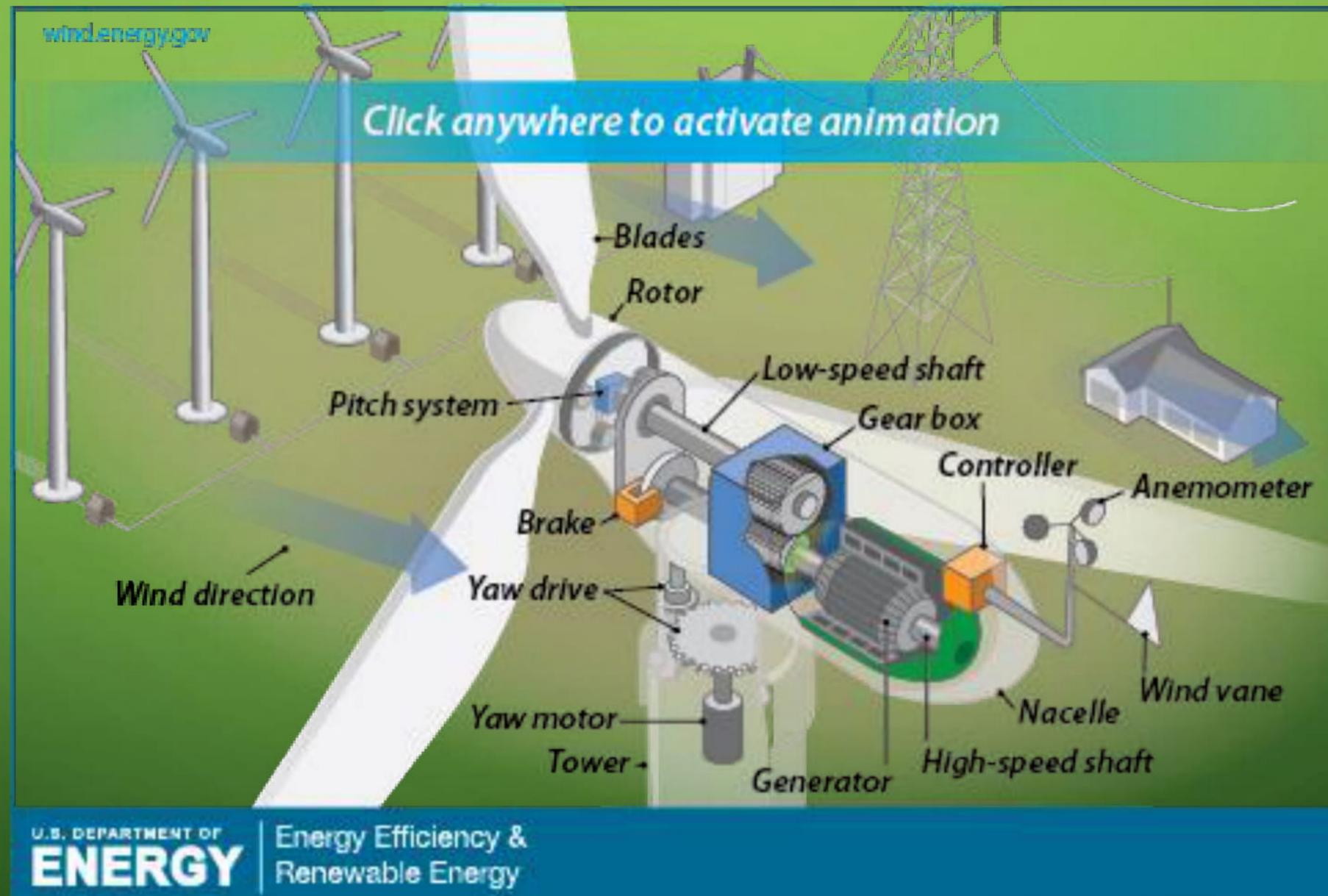
MALE HIDROELEKTRANE



VJETROGENERATOR – SINHRONI GENERATOR

- U vjetroagregatu se kao generator može takođe instalirati klasični **sinhroni generator**
- Postoje varijante sa prenosnikom (gearbox) ili bez njega
- U drugom slučaju se radi o mašinama ogromnog gabarita sa velikim brojem pari polova i uglavnom stalnim magnetima
- Međutim, situacija je sada drugačija u odnosu na onu u TE ili HE
- Vjetroturbina rotira varijabilnom brzinom – koju definiše brzina vjetra na koju nije moguće uticati

VJETROGENERATOR – PRINCIPIJELNA ŠEMA



POTREBA ZA POSTOJANJEM INVERTORA

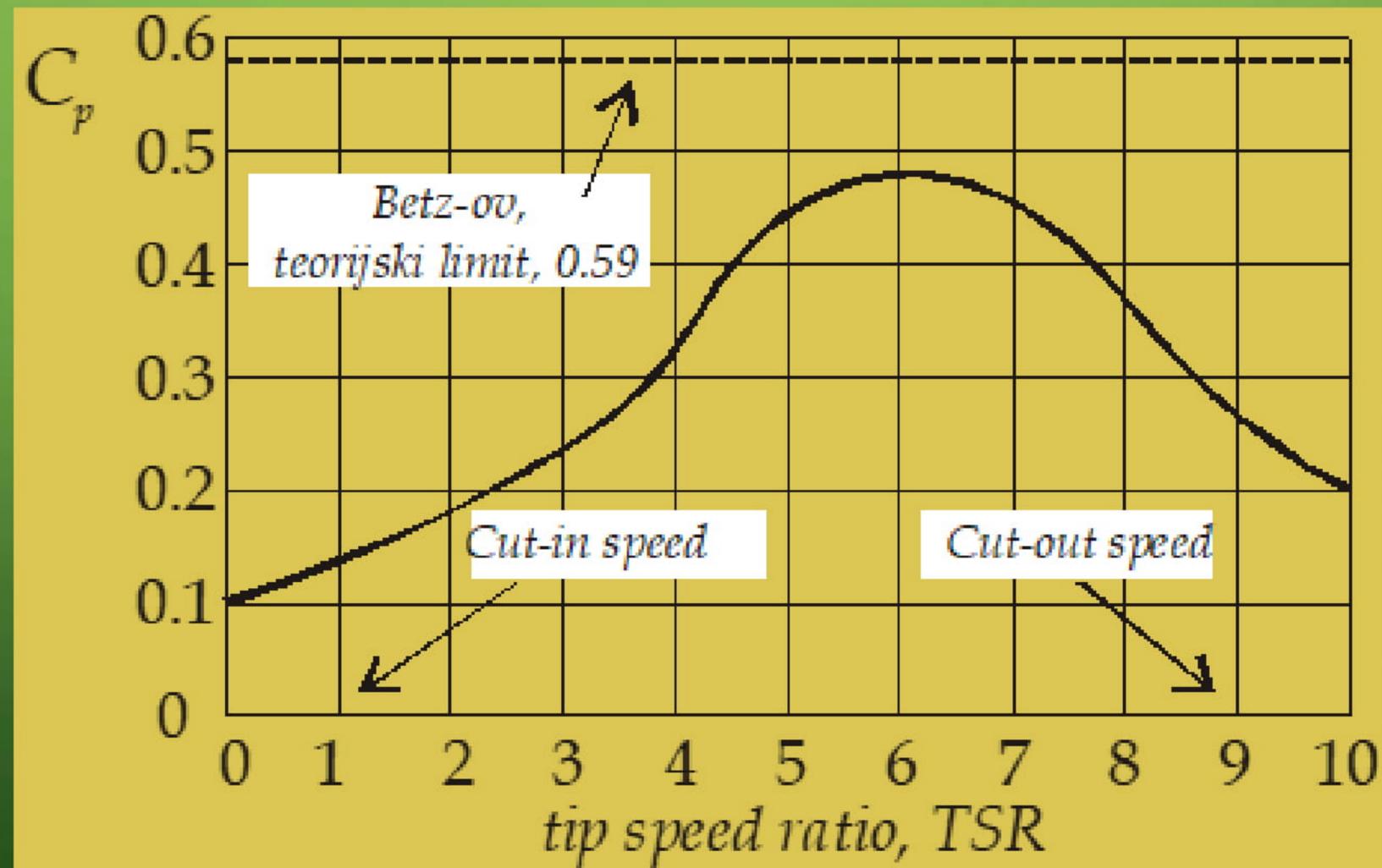
- Samim tim, generisana električna energija je promjenljive učestanosti
- Drugim riječima, sada je potrebno imati „interfejs“ između generatora i mreže stalne učestanosti (50Hz)
- Taj interfejs je **frekventni pretvarač – inverter** (uređaj energetske elektronike)
- U čemu je problem sa inverterom?
- Problem je u tome što inverter treba da bude iste snage kao i generator
- To značajno poskupljuje čitavu investiciju pogotovo u slučaju velikih snaga!

KAVEZNI ASINHRONI GENERATOR

- Ukoliko je u sklopu vjetroagregata kavezni asinhroni generator problem sa učestanošću je riješen ukoliko je on priključen na krutu mrežu – mreža definiše mrežnu učestanost
- Potreba postojanja multiplikatora (gearbox)
- Aktivnu snagu definiše brzina rotora iznad sinhronne brzine
- Reaktivna energija se preuzima iz mreže

KARAKTERISTIKA VJETROTURBINE (1)

- Vjetroturbina se karakteriše zavisnošću snage preuzete iz snage vjetra u funkciji tzv. **TSR-a (tip-speed ratio = odnos brzine vrha kraka elise i brzine vjetra)**



KARAKTERISTIKA VJETROTURBINE (2)

- Poželjno je da se pri ma kojoj brzini vjetra iz njega (iz vjetra) „izvuče“ maksimalna moguća snaga – teorijski maksimum je 59% - Betz-ov limit
- To se ostvaruje na način da se brzina turbine mijenja tako da radna tačka uvijek bude na maksimumu prethodno prikazane karakteristike
- Ovo se ostvaruje na različite načine
- Jedan od načina je da se mijenja nagib krakova elise što je skupo i komplikovano rešenje (**variable pitch-controlled system**)

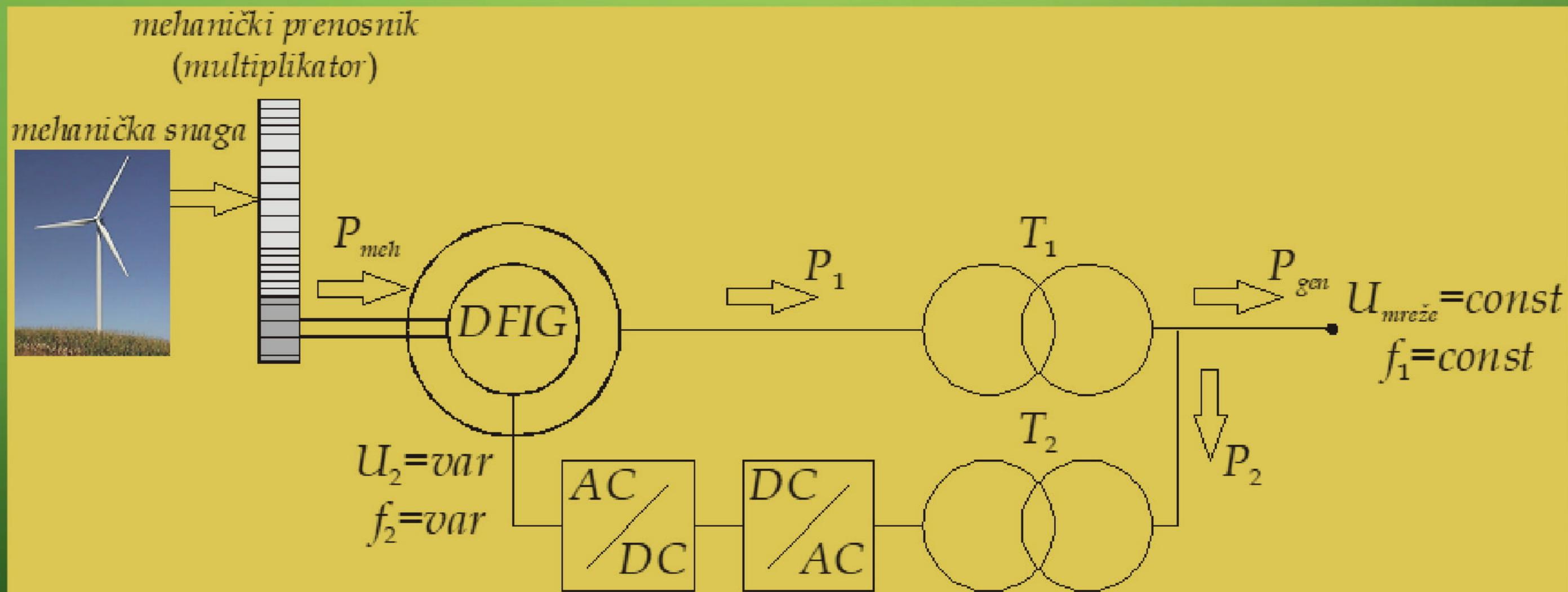
KARAKTERISTIKA VJETROTURBINE (3)



DVOSTRANO NAPAJANI ASINHRONI GENERATOR

- Jedno od mogućih rešenja je upošljavanje dvostrano napajanog asinhronog generatora
- **Double fed induction generator - DFIG**
- Upotrebom ove konfiguracione nema potrebe za pitch kontrolom
- Postoji potreba za inverterom ali u kolu rotora
- Iz tog razloga je inverter snage oko 30% nominalne snage generatora
- Složena kontrola, mogućnost regulacije i aktivne i reaktivne snage

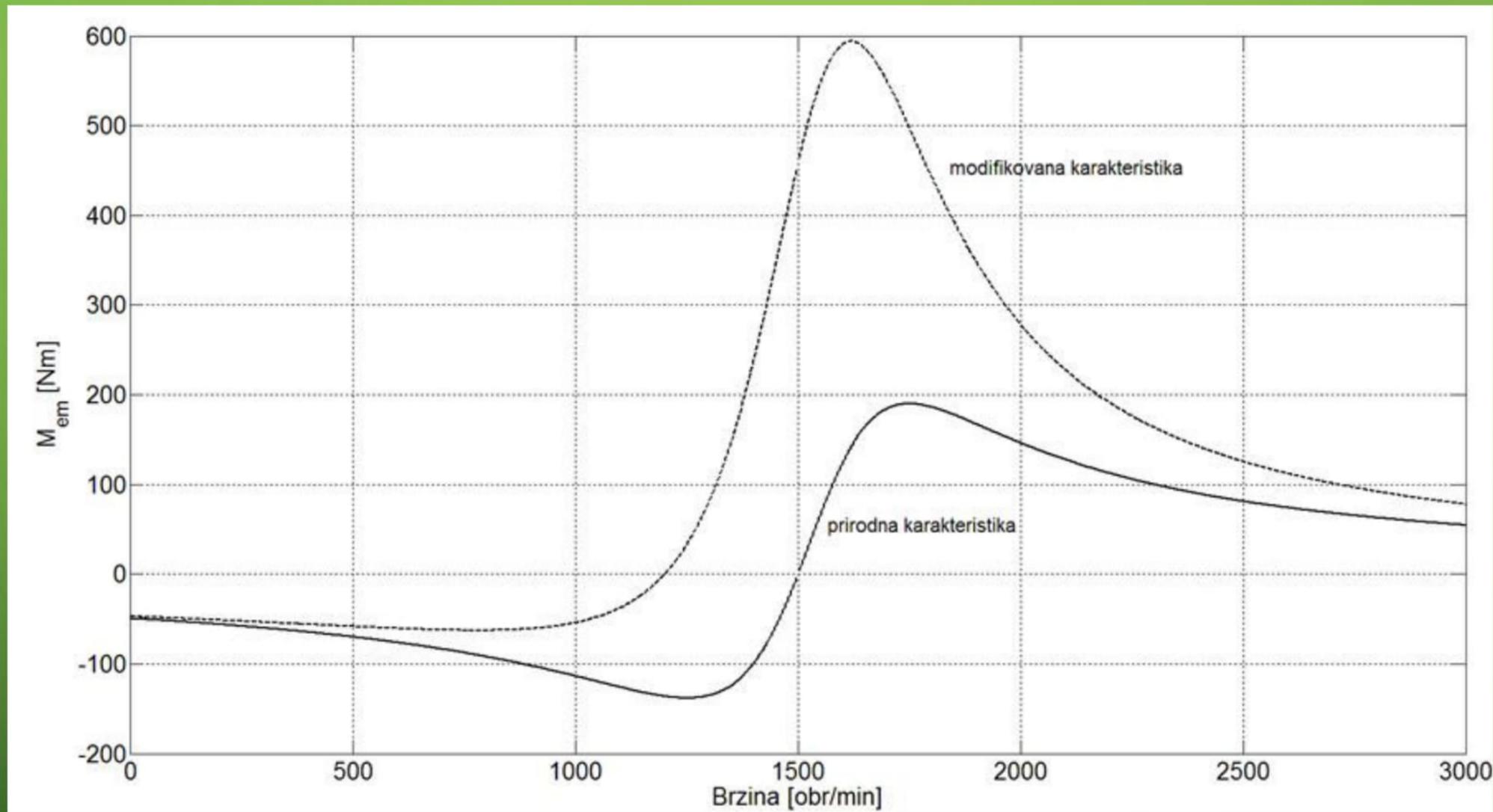
DFIG – PRINCIPIJELNA ŠEMA



BILANS SNAGA DFIG-A

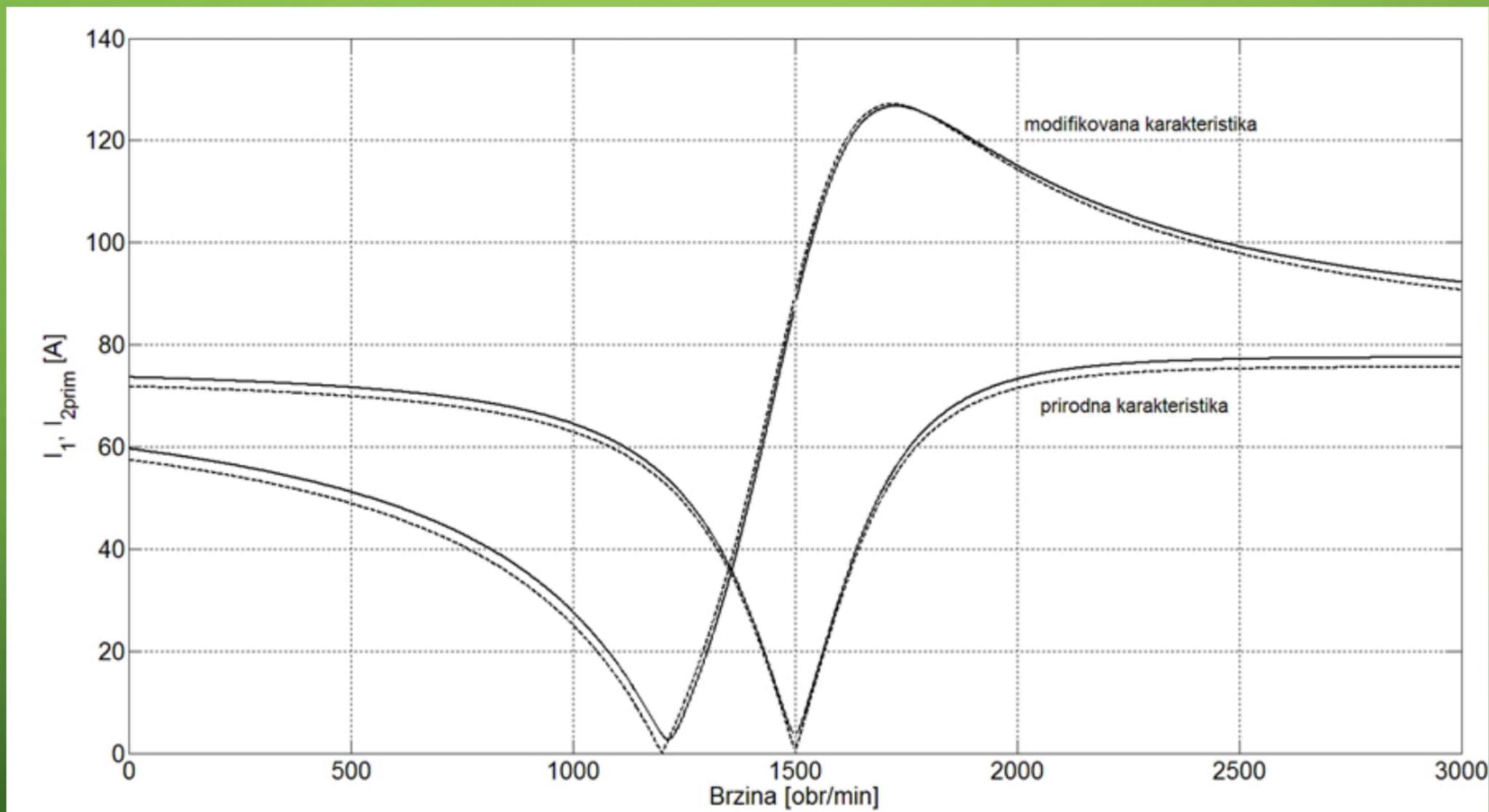
- Ubacivanjem napona učestanosti klizanja u kolo rotora, odgovarajuće efektivne vrijednosti i faznog stava ostvaruje se tok energije u rotor i iz rotora
- Slično se može kontrolisati i tok reaktivne energije
- Ostvaruje se praćenje optimalne radne tačke na karakteristici vjetroturbine
- Moguće je ostvariti **podsinhroni generatorski režim** – režim rada generatora pri brzinama manjim od sinhrona na račun električne energije koja se ubacuje u kolo rotora

PRIRODNA I MODIFIKOVANA MOMENTNA K-KA



Nova „sinhrona brzina“ od 1200 obr/min je ostvarena na račun izvesne količine električne energije koja se „ubacuje“ u kolo rotora

PRIRODNA I MODIFIKOVANA STRUJNA K-KA



Nova „sinhrona brzina“ od 1200 obr/min je ostvarena na račun izvesne količine električne energije koja se „ubacuje“ u kolo rotora

ZAKLJUČAK

Dat je kratak uvod u pojam pametne mreže i novi koncept EES

- Naglašena je potreba za uvođenjem sinhronih kompenzatora i sa aspekta poboljšanja stabilnosti EES
- Uočava se potreba postojanja frekventnih pretvarača
- Asinhroni generatori dobijaju na značaju, kojih nije bilo u konvencionalnom EES
- Kavezni asinhroni generatori u malim hidroelektranama
- Dvostrano napajani asinhroni generatori u vjetroelektranama

The background is a solid green color with a subtle gradient. In the four corners, there are decorative white line-art patterns resembling circuit traces or a stylized tree structure. These patterns consist of thin lines connecting small circles, creating a network-like appearance.

ZAHVALJUJEM VAM NA PAŽNJI