



پژوهشگاه نیرو
وزارت نیرو



بسم الله الرحمن الرحيم

کارگاه آموزشی

چالش‌های توسعه و بهره‌برداری شبکه برق کشور با ورود حجم بالای توان بادی به شبکه در آینده

انجمن انرژی بادی ایران
بهمن ۱۳۹۴



– تاثیر ورود نیروگاه‌های بادی بزرگ به شبکه در شاخه‌های طراحی و بهره‌برداری

– شاخصه‌ها و ویژگیهای مهم نیروگاه‌های بادی در مقایسه با نیروگاه‌های متعارف

– مطالعات تطبیقی کشورهای دیگر در خصوص چالش‌ها و ملاحظات ورود نیروگاه‌های بادی به شبکه

– معرفی ضوابط و معیارهای اتصال و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی بزرگ به شبکه سراسری برق



– معرفی ضوابط و معیارهای اتصال و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی بزرگ به شبکه سراسری برق

– انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری

– معرفی تجربیات اتصال و بهره‌برداری نمونه عملی در ایران

– هم‌اندیشی



مقدمه

– کنفرانس پاریس

هدف اصلی: کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پایین آوردن میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی

– همه کشورها متعهد به اجرای بخشی از این توافق خواهند بود و بخشی از آن را نیز می‌توانند داوطلبانه اجرا کنند.

ایران نیز کاهش چهاردرصدی تولید گازهای گلخانه‌ای را تا سال ۲۰۳۰ تصویب کرده و همچنین در صورت برداشتن و لغو همه تحریمها علیه ایران، این کشور به صورت داوطلبانه برای کاهش هشت درصد دیگر از تولید گازهای گلخانه‌ای اقدام خواهد کرد.



برنامه ریزی بکارگیری انرژی های تجدیدپذیر در ایران

در قانون برنامه پنجم توسعه، نصب پنج هزار مگاوات نیروگاه تجدیدپذیر هدفگذاری شده بود که از این میزان ۴۵۰۰ مگاوات آن برای توسعه انرژی بادی است.

همچنین در طول برنامه ششم توسعه، در نظر است ۵ درصد ظرفیت نیروگاهها، توسط نیروگاههای تجدیدپذیر تحت پوشش قرار گیرد.

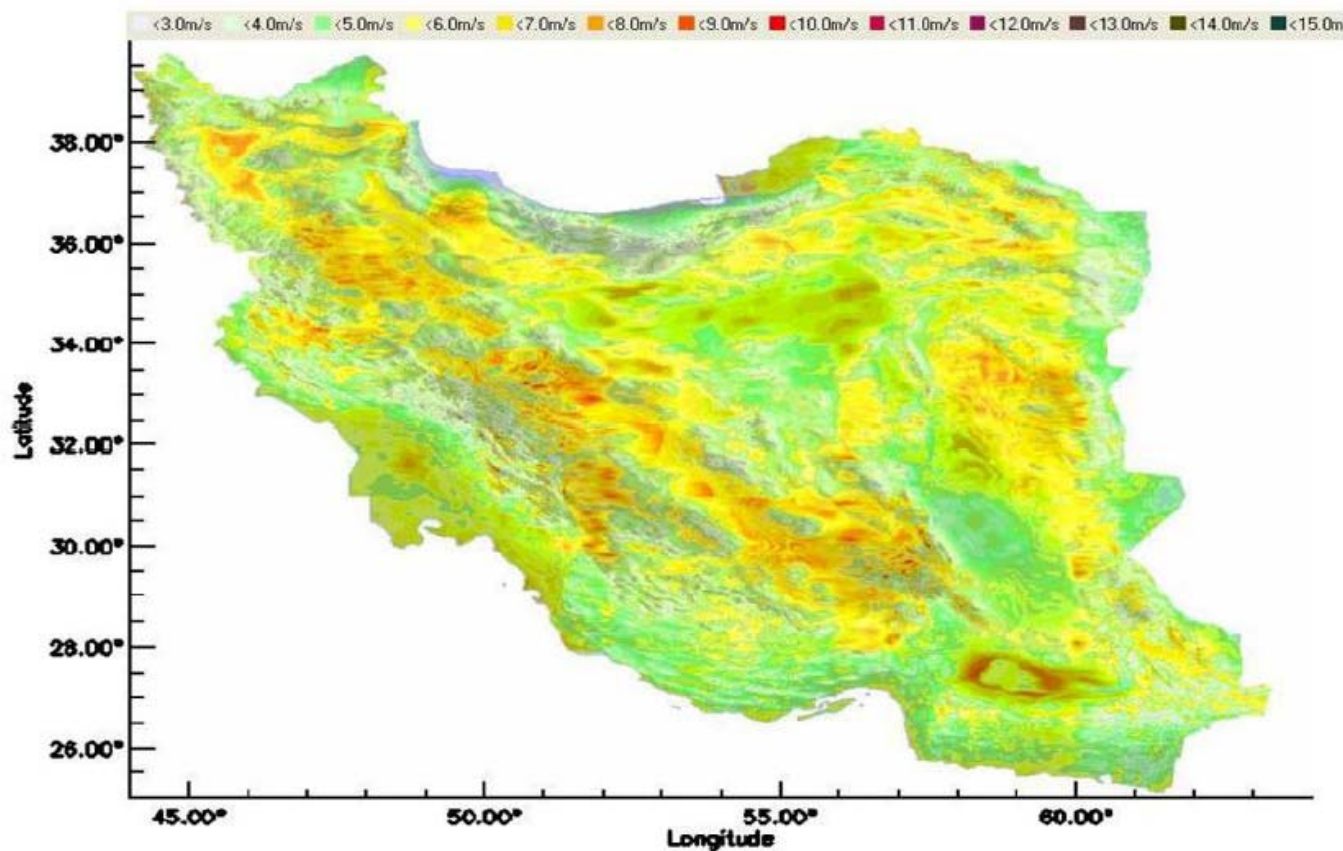
به هر حال با جهت گیری و تاکید بر توسعه استفاده از انرژی های تجدید پذیر در سبد انرژی و خصوصاً تولید برق، دیر یا زود باید شاهد افزایش ضریب نفوذ نیروگاههای تجدیدپذیر و در این بین، نیروگاههای بادی با سهم قابل توجهی باشیم.



پتانسیل سنجی انرژی بادی در ایران

میزان انرژی قابل استحصال بادی کشور از لحاظ اقتصادی بالغ بر ۱۸۰۰۰ مگاوات تخمین زده می شود

Update Draft Zero Windmap Iran in 80 m above ground





برنامه ریزی بکارگیری انرژیهای تجدیدپذیر در ایران

در مورد دستیابی به فناوری نیروگاههای بادی در کشور چه از طریق توسعه درونزا و یا انتقال فناوری، فعالیتهای خوبی در کشور انجام شده است.

لکن آنچه که به نظر می رسد در این بین کمتر به آن توجه شده است، لزوم آمادگی شبکه برق کشور از دو دیدگاه طراحی و بهره برداری با ورود حجم نسبتاً بالای تولید تجدیدپذیر به شبکه است.

ورود نیروگاههای بادی بزرگ به شبکه چالشهای اتصال و بهره برداری متعددی را در پی دارد که باید پیش از ورود حجم انبوه آنها، مطالعه و برای آنها چاره اندیشی شود



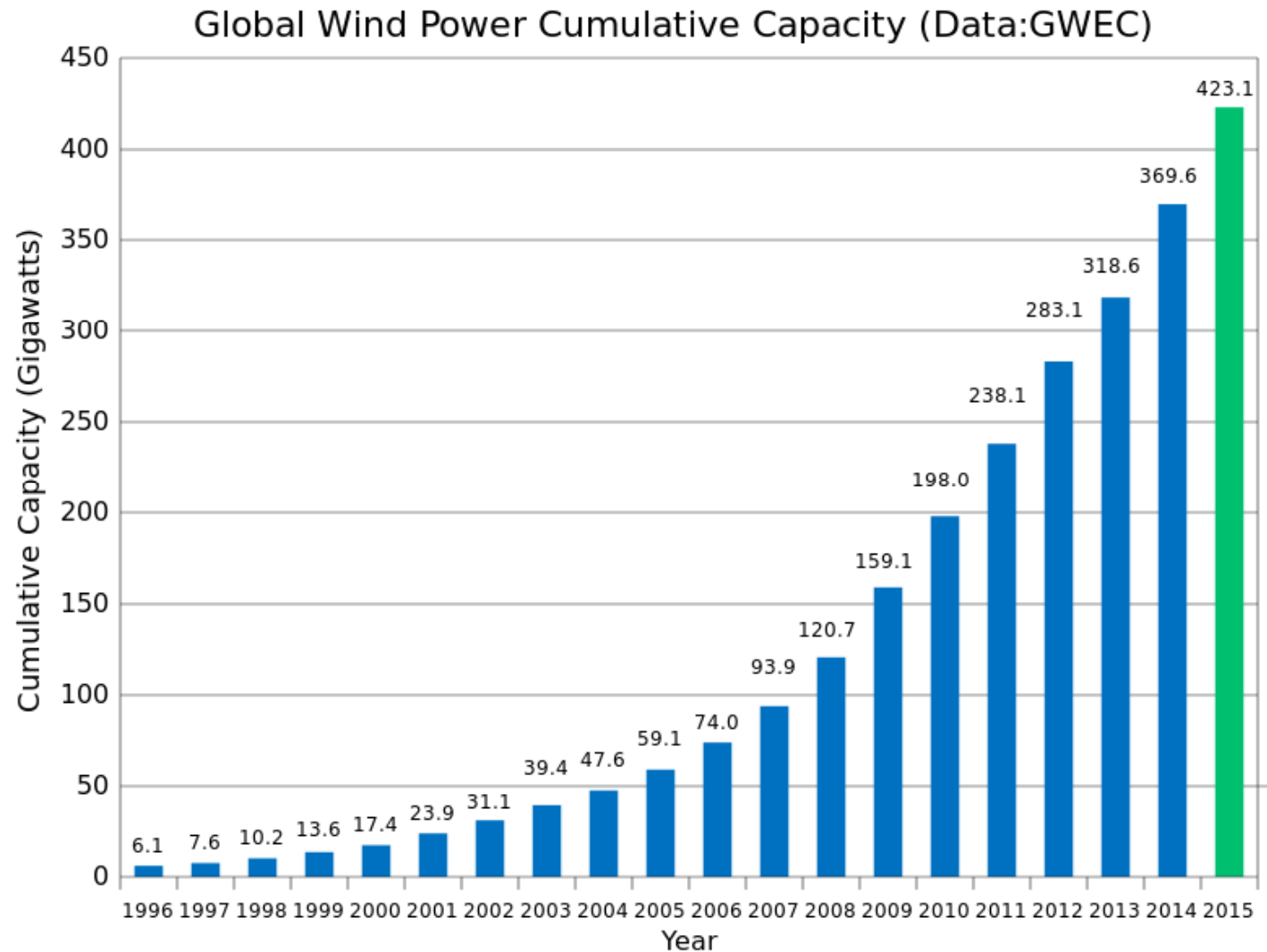
روند توسعه بکارگیری نیروگاه‌های بادی در دنیا

www.nri.ac.ir



چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

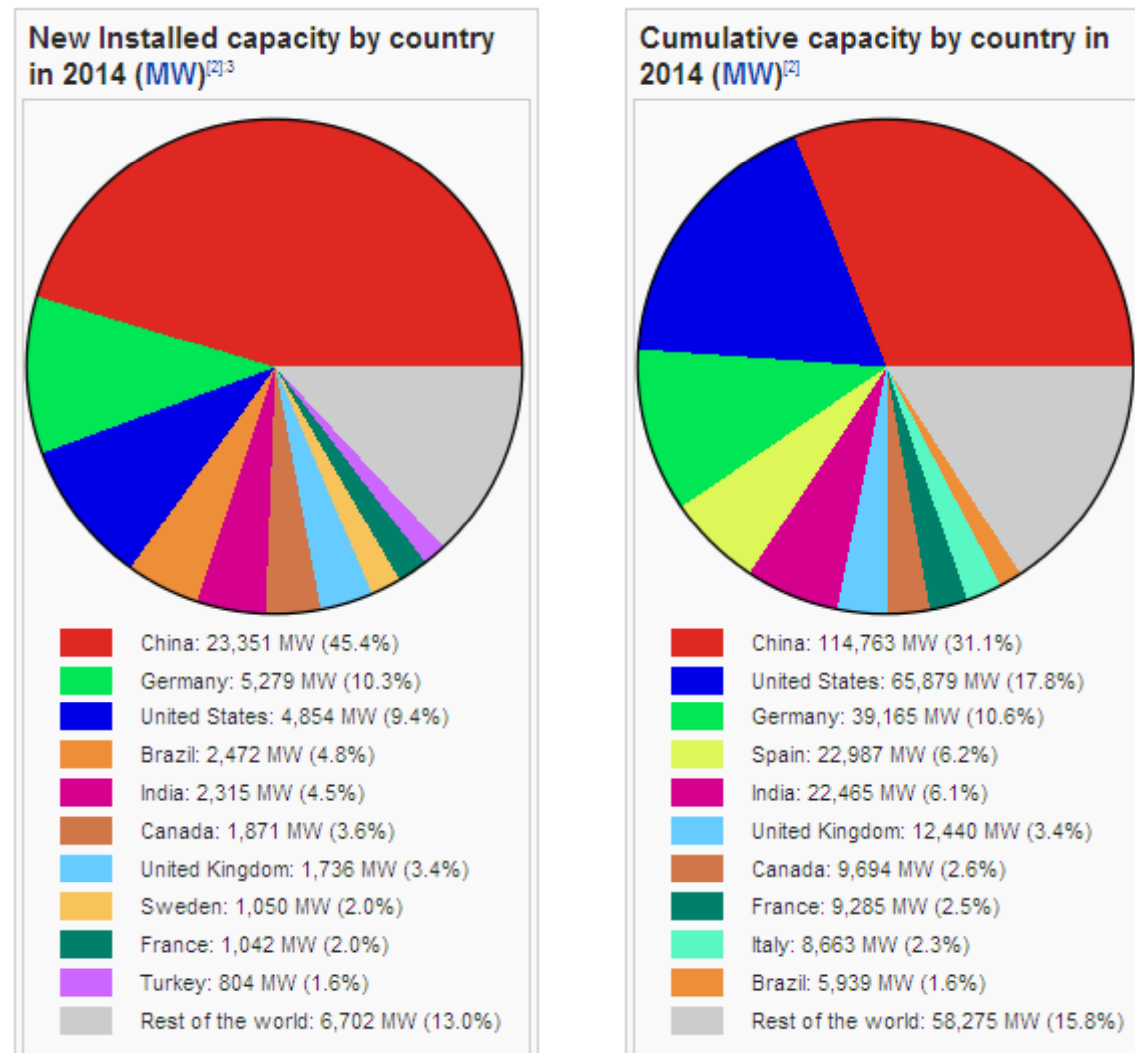
روند توسعه ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی در دنیا طی سالهای گذشته





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

ظرفیتهای نصب شده نیروگاه‌های بادی در دنیا در سال ۲۰۱۴





















چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

رتبه‌بندی کشورها در ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی طی سالهای گذشته

Installed windpower capacity (MW)^{[1][2][3][4][5][6][7][8][9][10][11][12][13][14][15][16][17][18][19][20][21][22][23][24]}

#	Nation	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
-	 European Union	48,122	56,614	65,255	74,919	84,278	93,957	106,454	117,384	128,752	
1	 China	2,599	5,912	12,210	25,104	44,733	62,733	75,564	91,412	114,763	
2	 United States	11,603	16,819	25,170	35,159	40,200	46,919	60,007	61,110	65,879	
3	 Germany	20,622	22,247	23,903	25,777	27,214	29,060	31,332	34,250	39,165	
4	 Spain	11,630	15,145	16,740	19,149	20,676	21,674	22,796	22,959	22,987	
5	 India	6,270	7,850	9,587	10,925	13,064	16,084	18,421	20,150	22,465	
6	 United Kingdom	1,963	2,389	3,288	4,070	5,203	6,540	8,445	10,711	12,440	
7	 Canada	1,460	1,846	2,369	3,319	4,008	5,265	6,200	7,823	9,694	
8	 France	1,589	2,477	3,426	4,410	5,660	6,800	7,196	8,243	9,285	
9	 Italy	2,123	2,726	3,537	4,850	5,797	6,747	8,144	8,558	8,663	
10	 Brazil	237	247	339	606	932	1,509	2,508	3,466	5,939	
11	 Sweden	571	831	1,067	1,560	2,163	2,970	3,745	4,382	5,425	
12	 Portugal	1,716	2,130	2,862	3,535	3,702	4,083	4,525	4,730	4,914	
13	 Denmark	3,140	3,129	3,164	3,465	3,752	3,871	4,162	4,807	4,845	
14	 Poland	153	276	472	725	1,107	1,616	2,497	3,390	3,834	
15	 Australia ^[25]	651	824	1,306	1,712	1,991	2,176	2,584	3,239	3,806	



چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه



















رتبه‌بندی کشورها در ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی طی سالهای گذشته

15	Australia ^[25]	651	824	1,306	1,712	1,991	2,176	2,584	3,239	3,806
16	Turkey	65	207	433	801	1,329	1,799	2,312	2,958	3,763
17	Romania	2	7	10	14.1	462	982	1,905	2,600	2,954
18	Netherlands	1,571	1,759	2,237	2,223	2,237	2,328	2,391	2,671	2,805
19	Japan	1,309	1,528	1,880	2,056	2,304	2,501	2,614	2,669	2,789
20	Mexico	84	85	85	520	733	873	1,370	1,859	2,551
21	Ireland	746	805	1,245	1,260	1,379	1,614	1,738	2,049	2,272
22	Austria	965	982	995	995	1,011	1,084	1,378	1,684	2,095
23	Greece	758	873	990	1,087	1,208	1,629	1,749	1,866	1,980
24	Belgium	194	287	384	563	911	1,078	1,375	1,651	1,959
25	Chile	-	-	-	20	168	172	205	331	836
26	Norway ^{[26][27][28]}	325	333	428	431	441	512	704	811	819
27	Morocco	64	125	125	253	286	291	291	487	787
28	Uruguay	-	-	-	-	-	43	56	59	701
29	Bulgaria	36	70	120	177	500	612	674	681	691
30	Taiwan	188	280	358	436	519	564	564	614	633
31	Finland	86	110	143	147	197	199	288	447	627
32	New Zealand	171	322	325	497	530	623	623	623	623
33	Egypt	230	310	390	430	550	550	550	550	610



چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

رتبه‌بندی کشورها در ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی طی سالهای گذشته

32	 New Zealand	171	322	325	497	530	623	623	623	623
33	 Egypt	230	310	390	430	550	550	550	550	610
34	 South Korea	176	192	278	348	379	407	483	561	609
35	 South Africa	-	-	-	-	-	-	-	10	570
36	 Ukraine	86	89	90	94	87	151	302	371	498
37	 Croatia	n/a	n/a	69.4	104	152	187.4	207.1	302	347
38	 Hungary	61	65	127	201	295	329	329	329	329
39	 Estonia	31.8	59	78	142	149	184	269	280	302
40	 Czech Republic	57	116	150	192	215	217	260	269	282
41	 Lithuania	56	50	54	91	163	203	263	279	279
42	 Argentina	-	-	-	-	-	113	167	218	271
43	 Panama	-	-	-	-	-	-	-	-	270
45	 Tunisia	-	-	-	-	-	54	104	255	255
46	 Thailand	-	-	-	-	-	7	112	223	223
47	 Philippines	-	-	-	-	-	-	-	66	216
48	 Costa Rica	-	-	74	123	119	132	147	148	198
49	 Ethiopia	-	-	-	-	-	23	81	171	171
50	 Nicaragua	-	-	-	-	-	62	102	146	186
51	 Honduras	-	-	-	-	-	-	102	102	152



چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

رتبه‌بندی کشورها در ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی طی سالهای گذشته

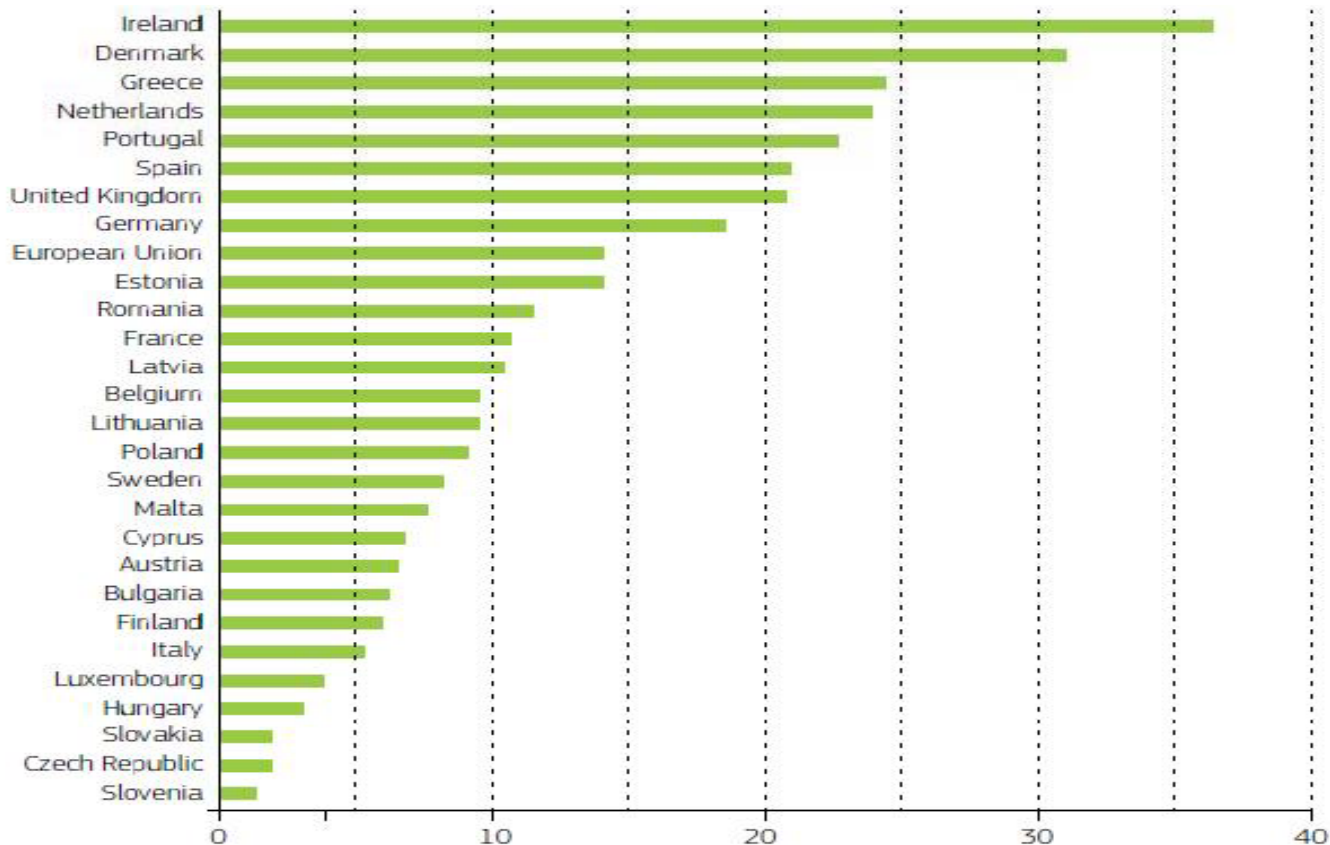
50	Nicaragua	-	-	-	-	-	62	102	146	186
51	Honduras	-	-	-	-	-	-	102	102	152
52	Iran	47	67	82	91	91	91	91	91	n.a.
53	Sri Lanka	-	-	-	-	-	-	63	63	n.a.
54	Mongolia	-	-	-	-	-	-	-	50	n.a.
55	Venezuela	-	-	-	-	-	-	30	-	n.a.
56	Cape Verde	-	-	-	-	-	24	24	24	24
	Caribbean	-	-	-	-	-	-	191	250	250
	Pacific Islands	-	-	-	-	-	12	12	12	12
	Rest of Europe	-	-	-	-	-	3,815	4,956	5,715	6,543
	Rest of Latin America & Caribbean	-	-	-	-	-	54	54	250	-
	Rest of Africa & Middle East	-	-	-	-	-	-	1,165	1,255	129
	Rest of Asia	-	-	-	-	-	71	87	-	167
	World total capacity (MW)	74,151	93,927	121,188	157,899	197,637	238,035	282,482	318,596	369,553



چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

برنامه‌ریزی کشورهای عضو اتحادیه اروپا برای بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی

Wind energy share of electricity consumption by 2020 per Member States and EU according to the EU-27 National Renewable Energy Action Plans (EC Energy, 2104a).

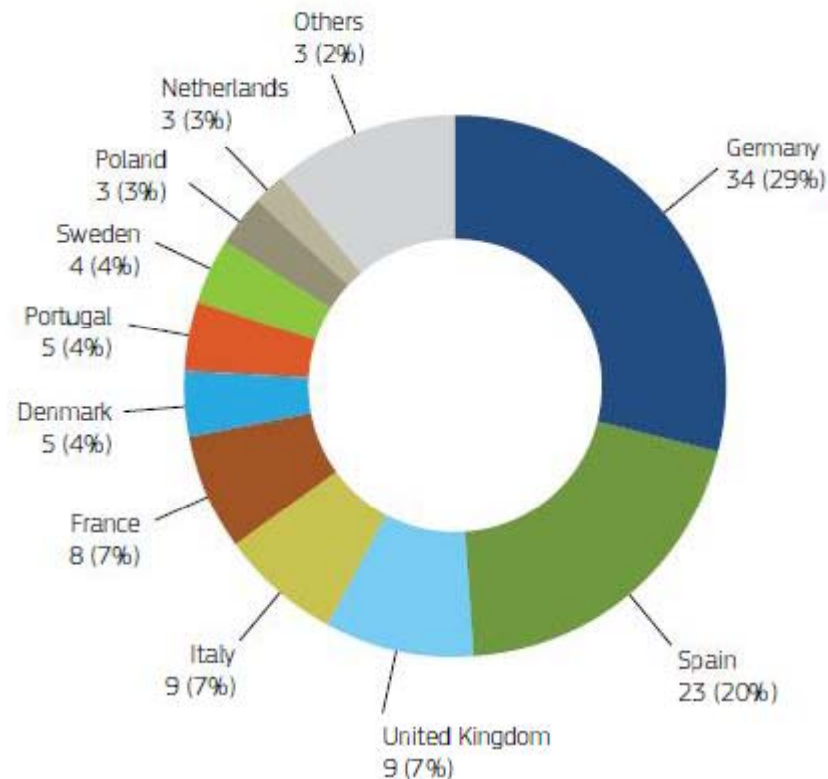




چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی کشورهای عضو اتحادیه اروپا

Figure 3 – EU Member States cumulative wind installed capacity at the end of 2013 (values in GW and in percentage) – (EWEA, 2014a).





معرفی چالشهای ورود نیروگاههای بادی به شبکه

www.nri.ac.ir



چالشهای ورود نیروگاههای بادی به شبکه انتقال

- ۱- تصادفی بودن تولید نیروگاههای بادی و نیز ضریب بهره‌برداری کم آنها
- ۱-۲- تاثیر بر برنامه‌ریزی تولید
- ۱-۱- تاثیر بر قابلیت اطمینان (کفایت و امنیت) شبکه
- ۲- رفتار متمایز نیروگاههای بادی در بخش کنترل توان اکتیو و راکتیو
- ۳- افزایش خطرپذیری ناپایداری ولتاژ به دلیل قابلیت پایین کنترل توان راکتیو
- ۴- رفتار متمایز نیروگاههای بادی در حالات غیر استاتیک
- ۵- ایجاد آلودگی الکتریکی قابل ملاحظه به دلیل وجود مبدل‌های الکترونیک قدرت



۱- محاسبه و انتخاب میزان مناسب توسعه شبکه برای ورود
نیروگاه بادی

۲- برآورده کردن الزامات اتصال و بهره‌برداری نیروگاههای
بادی

۳- برنامه‌ریزی مناسب تولید برای غلبه بر خصلت تصادفی بودن
تولید نیروگاه بادی



۴- پایدارسازی واحد بادی برای غلبه بر اغتشاشات ولتاژ و توان به منظور جلوگیری از خروج‌های غیر ضروری

۵- تحلیل اثر متقابل نیروگاه و شبکه بر یکدیگر به منظور به حداقل رساندن تاثیرات سوء

۶- تعیین نقطه مناسب اتصال نیروگاه به شبکه به منظور ایجاد بهترین عملکرد استاتیکی و دینامیکی نیروگاه



نیروگاههای بادی در موارد متعددی با نیروگاههای متعارف تفاوت دارند که نیاز به تدوین رویه مطالعات شبکه به همراه این نیروگاهها را در پی دارد.

۱- ضریب بهره‌برداری پایین نیروگاههای بادی

۲- خصلت غیردائمی و تصادفی بودن توان خروجی نیروگاه بادی

۳- تفاوت ماهوی ژنراتور مولد برق در این نیروگاه نسبت به نیروگاههای متعارف

۴- کاربرد تجهیزات الکترونیک قدرت در سطح توان نسبتاً بالا و نتیجتاً چالش‌های کیفیت توان



روند مطالعات سیستم با وجود نیروگاههای بادی در شبکه

۱- مطالعات حالت استاتیک شبکه

۲- ظرفیت سازی شبکه

۳- مطالعات قابلیت اطمینان شبکه شامل کفایت و امنیت

۴- مطالعات حالت دینامیک و گذرای شبکه

۵- مطالعات ارزیابی کیفیت توان با ورود نیروگاههای بادی



چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

مطالعات پایه‌ای برای اتصال و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی

System adequacy

Capacity credit
contribution
to generation
adequacy

Grid planning

System security

System stability
characteristics

Fault current
contribution

Inertia and
frequency
response

System operation

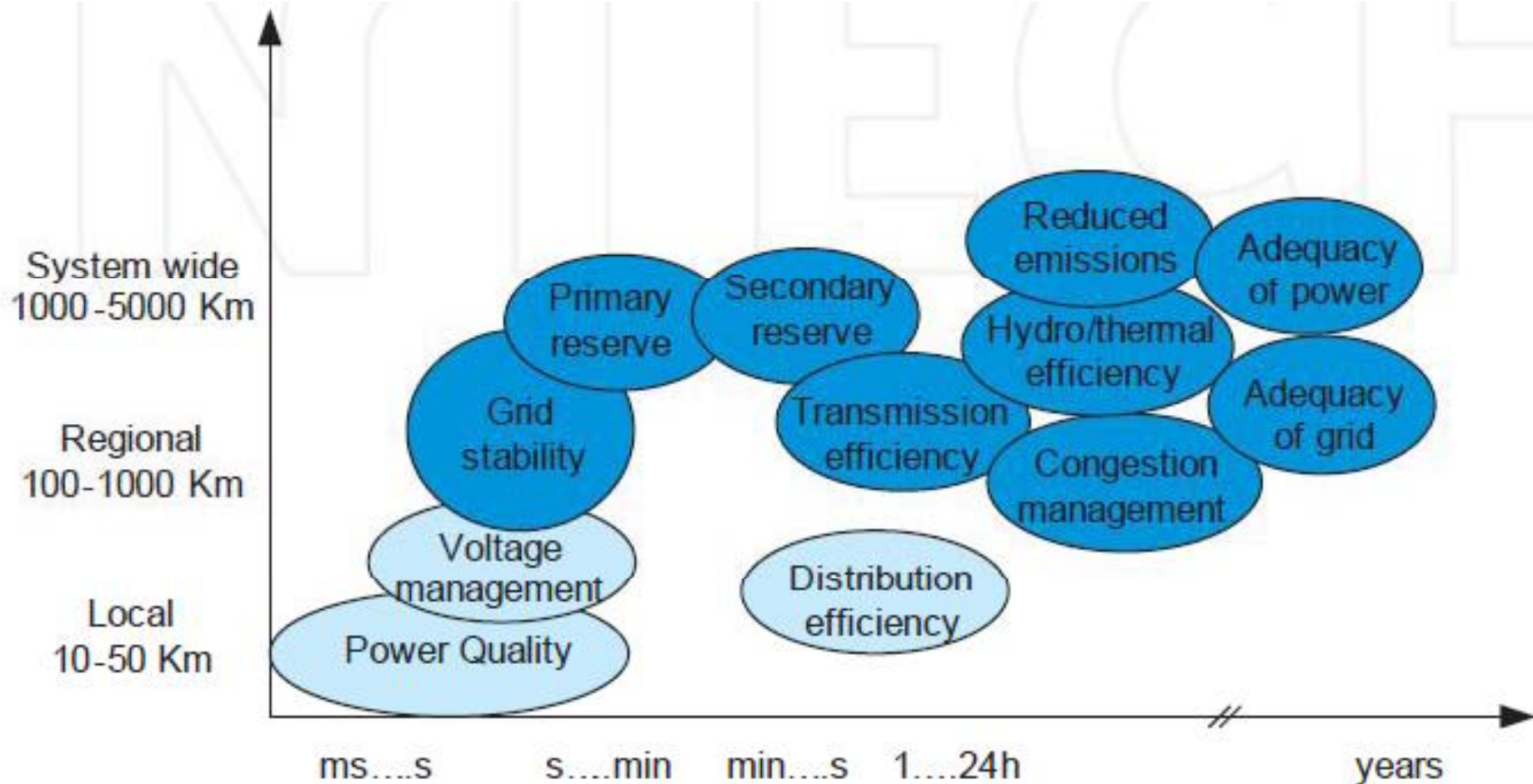
Balancing
methodology
and reserve
requirements

Voltage control,
real-time
monitoring
and network
management



چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

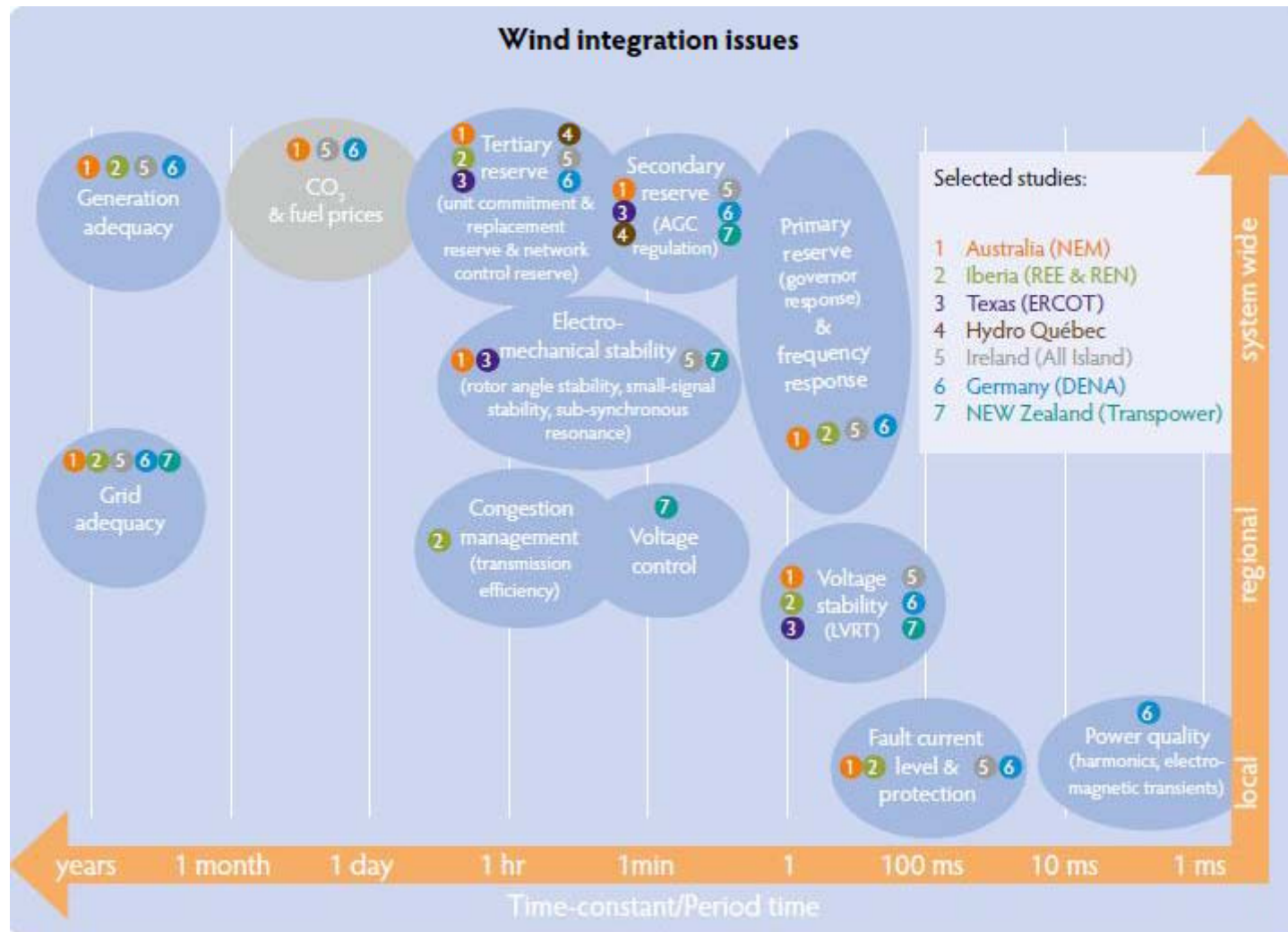
اثرات نیروگاه‌های بادی در محدوده زمان و مکان





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

مطالعات پایه‌ای برای اتصال و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

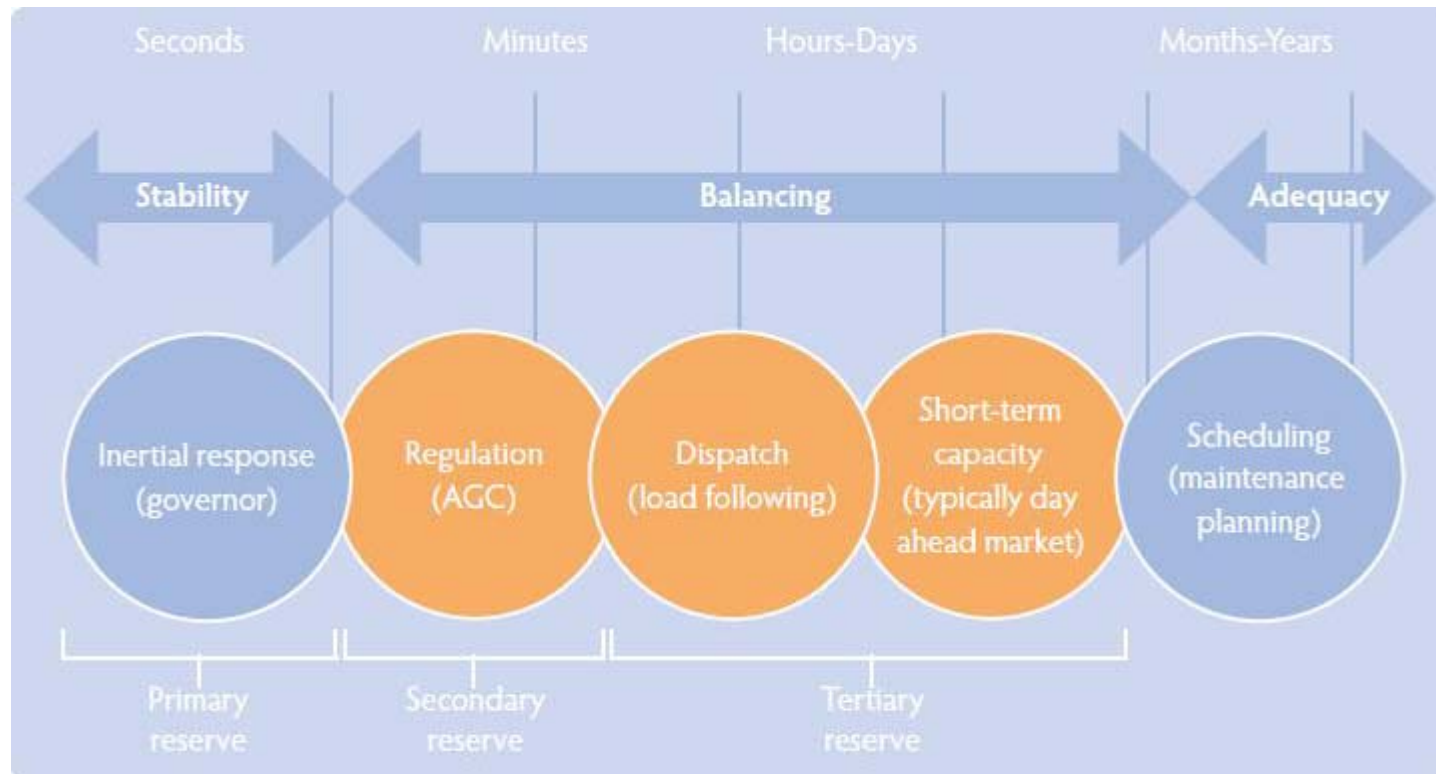
مطالعات پایه‌ای برای اتصال و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

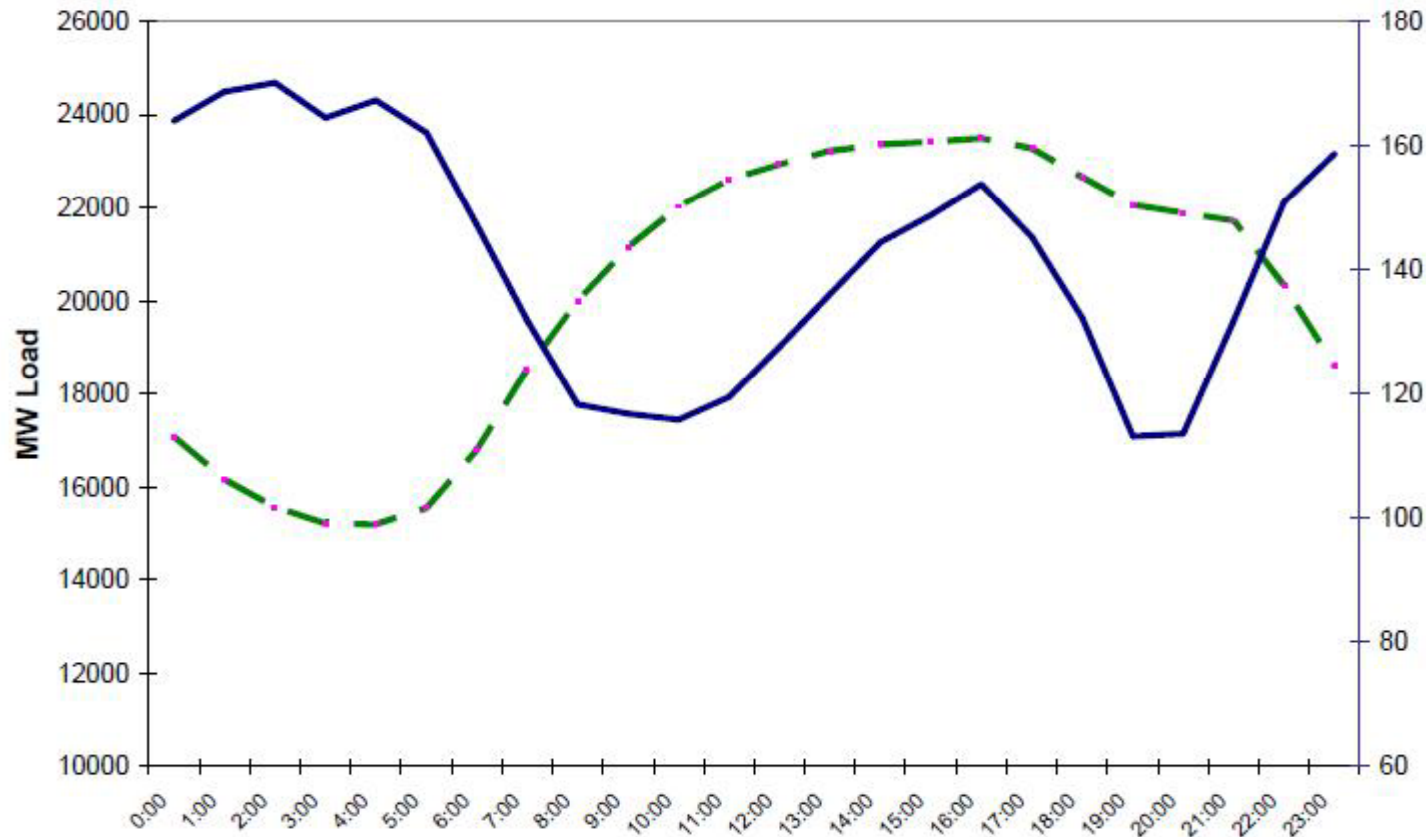
مطالعات پایه‌ای برای اتصال و بهره‌برداری نیروگاه‌های بادی





چالش‌های بکارگیری نیروگاههای بادی در شبکه

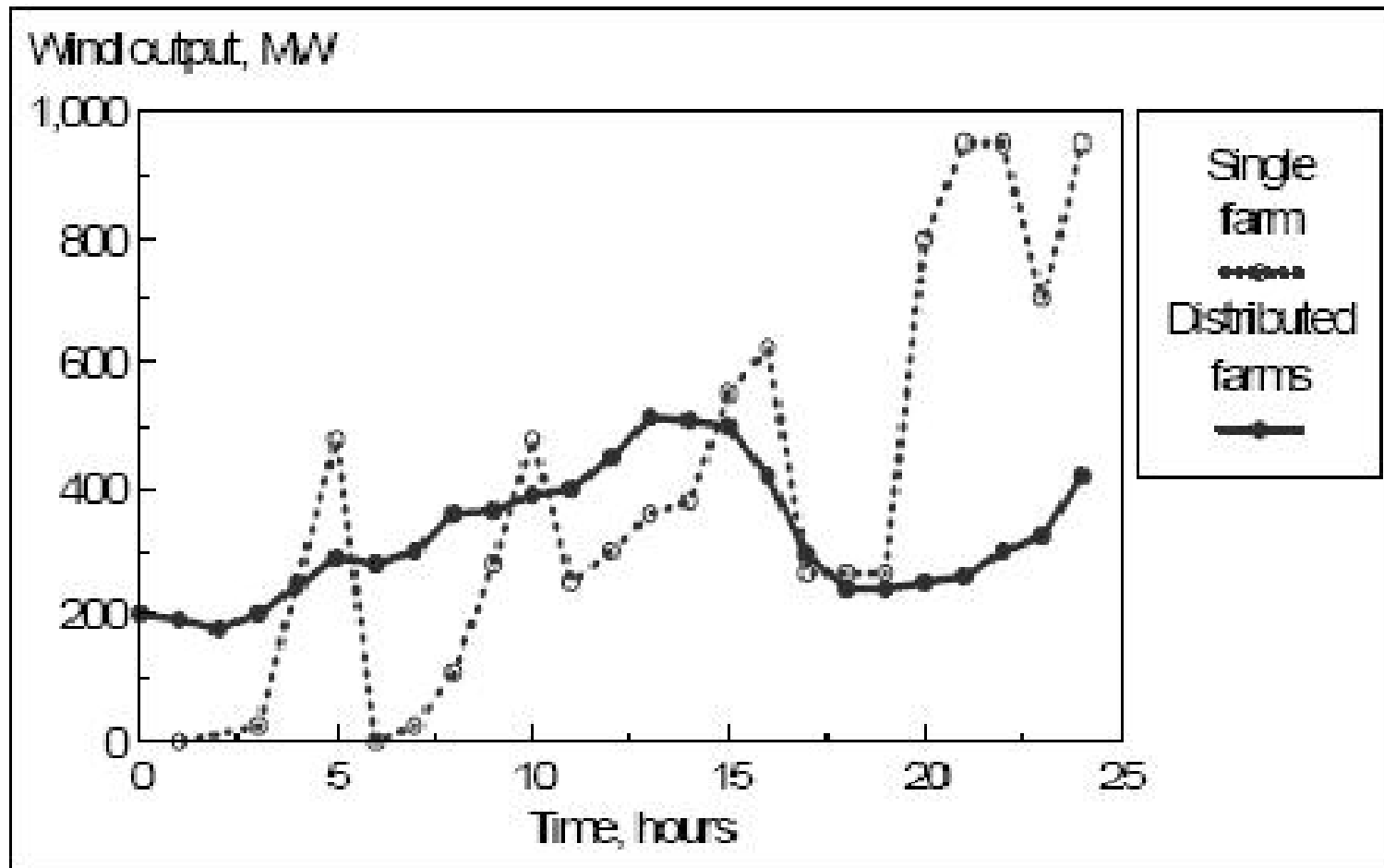
تغییرات بار روزانه (منحنی سبز رنگ) در مقابل تولید توان بادی (منحنی آبی رنگ)





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

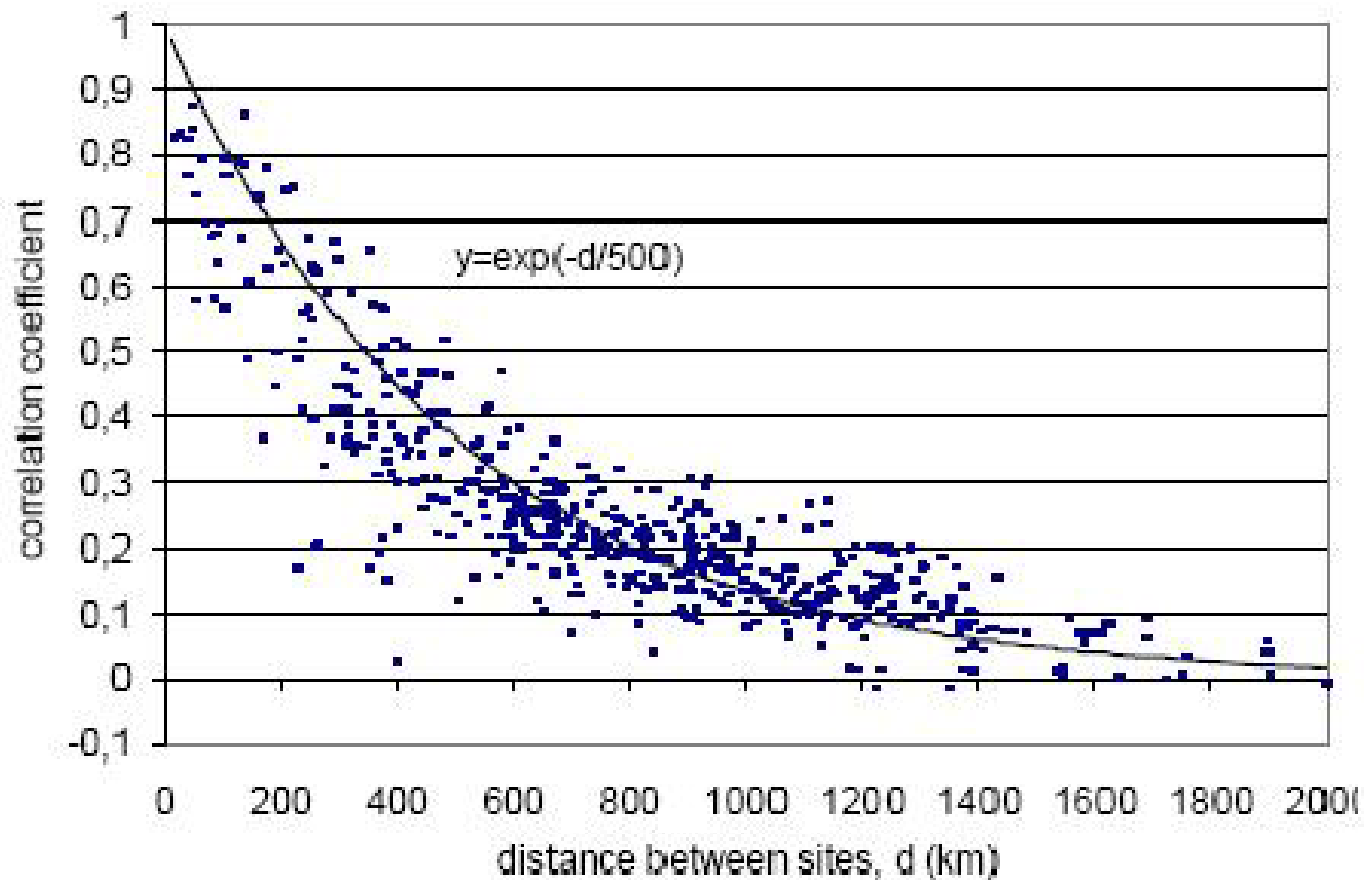
تأثیر پراکندگی واحدهای تولید بادی در یکنواخت شدن خروجی توان





چالش‌های بکارگیری نیروگاههای بادی در شبکه

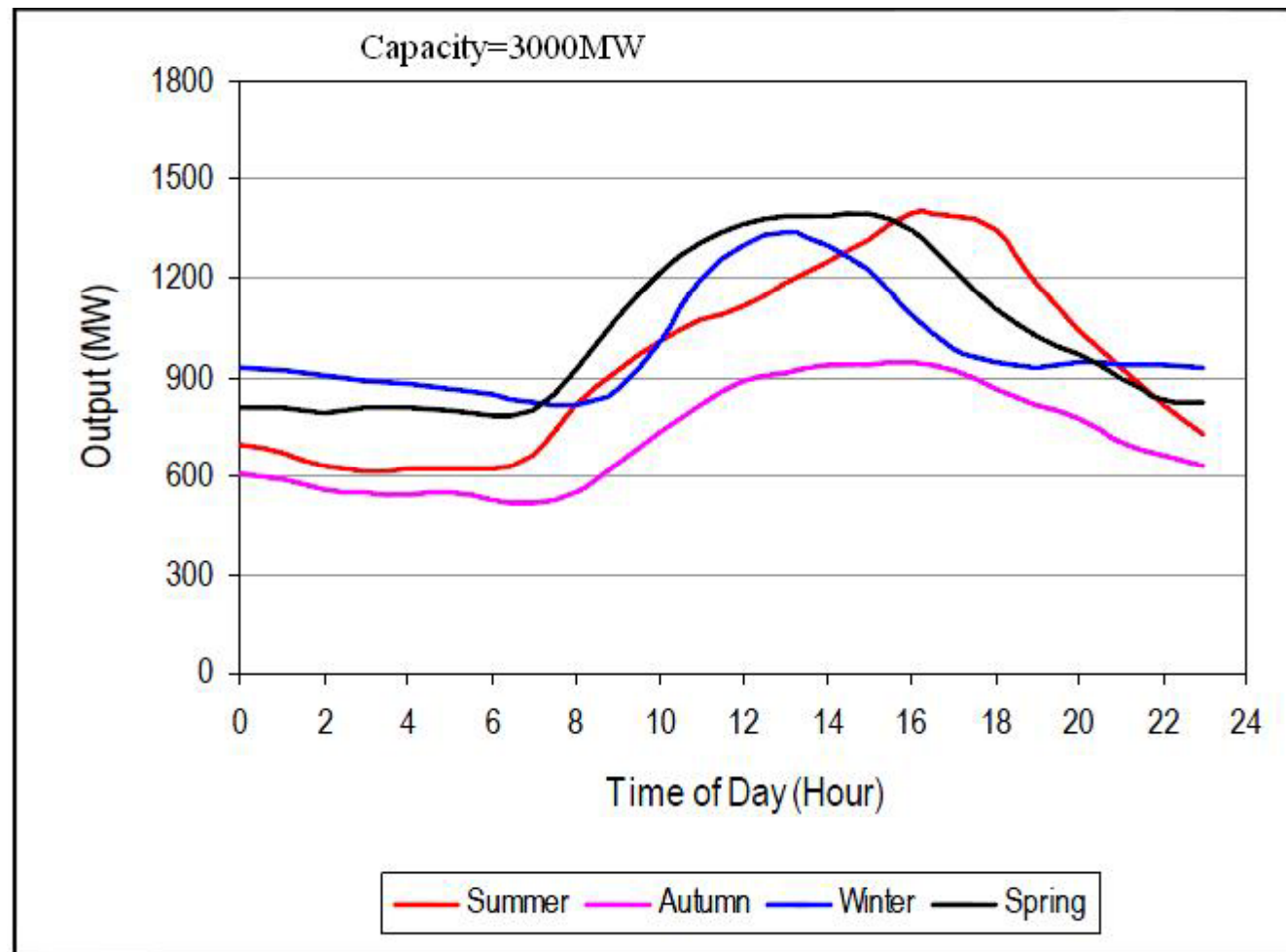
وابستگی تولید واحدهای بادی نسبت به فاصله از یکدیگر





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

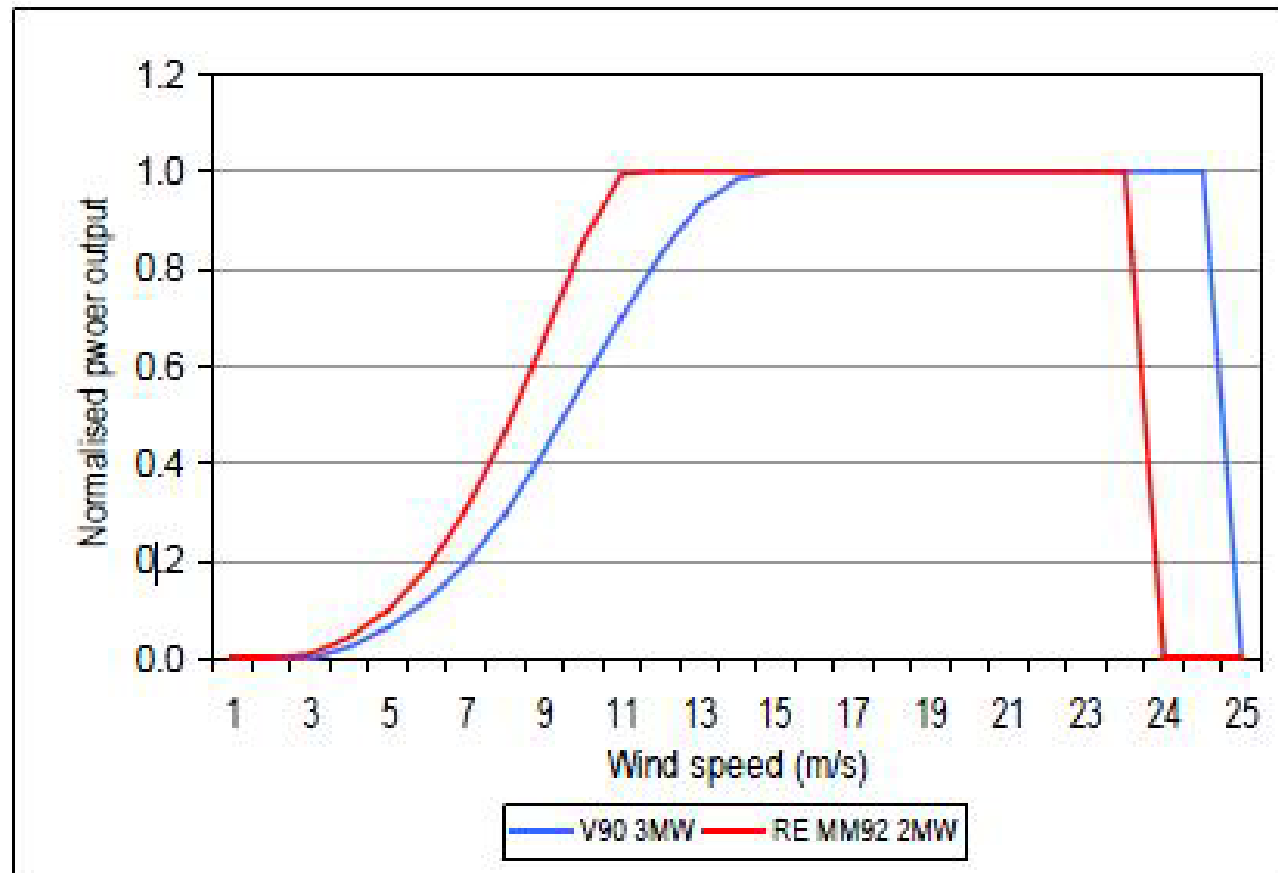
نوسانات تولید نیروگاه‌های بادی در طول سال - رژیم باد منطقه





چالش‌های بکارگیری نیروگاههای بادی در شبکه

انتخاب بهینه توربین بادی به منظور جذب حداکثر توان بادی





انواع ژنراتورهای مورد کاربرد در واحد بادی



انواع ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاههای بادی

Types of Wind Generators [1, 2, 3, 4, 5, 6]

Squirrel Cage Induction	Doubly Fed Induction	Direct Drive Synchronous
Simple and Robust	Less mechanical stress	Less mechanical stress
Less expensive	Less noisy	Less noisy
Electrically efficient	Aerodynamically efficient	Aerodynamically efficient
Standard generator	Standard generator	No gearbox
	Small converter	
Aerodynamically less efficient	Electrically less efficient	Electrically less efficient
Gearbox included	Gearbox included	Large converter
Mechanical stress	Expensive	Expensive
Noisy		Complex, heavy and large generator

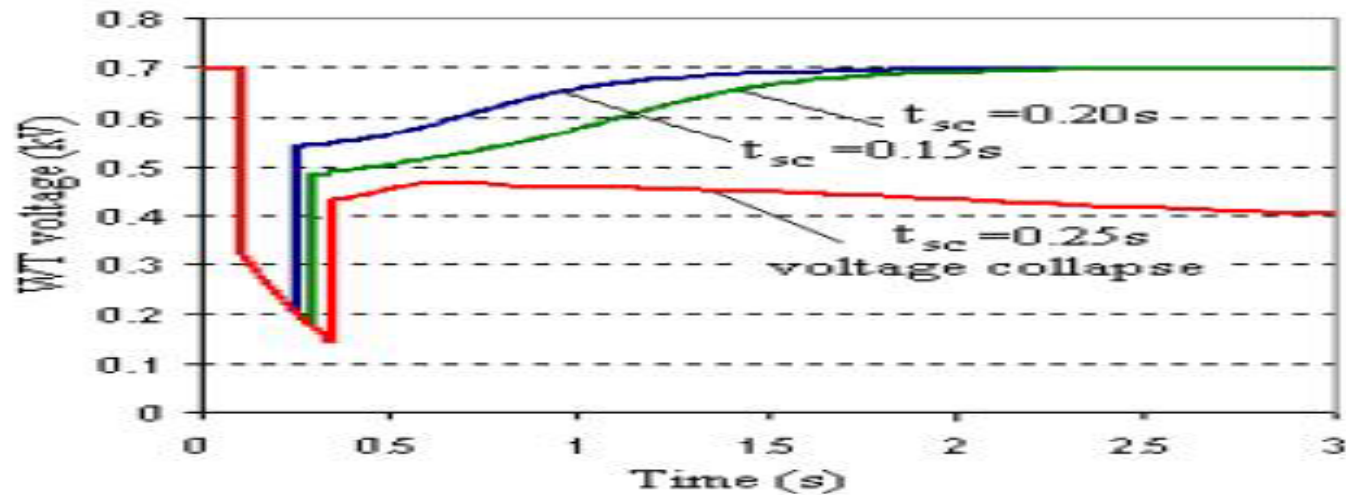


ملاحظات ولتاژ و جلوگیری از خروج ژنراتور حین ولتاژ پایین

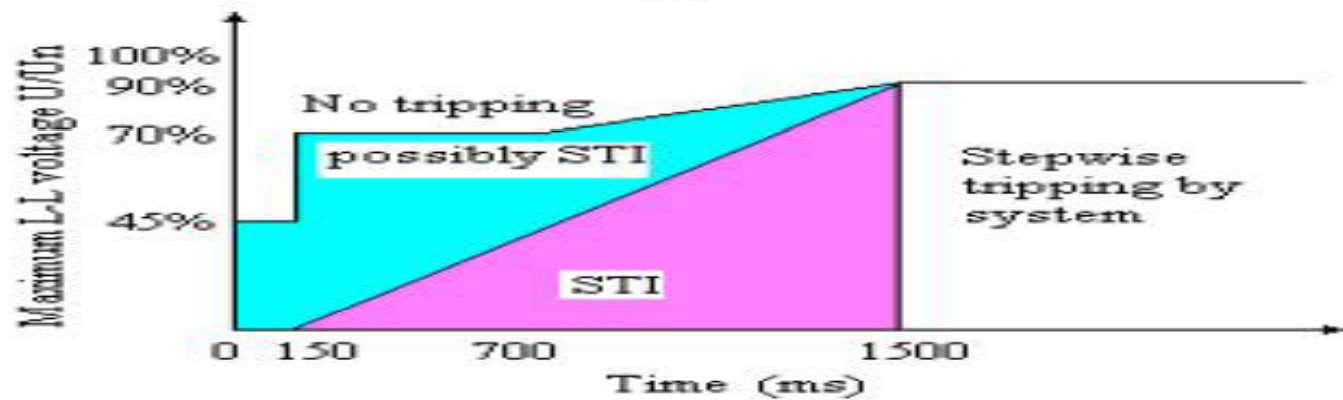


چالش‌های بکارگیری نیروگاههای بادی در شبکه

رفتار واحدهای بادی در برابر فروافتادگی (Dip) ولتاژ



(a)

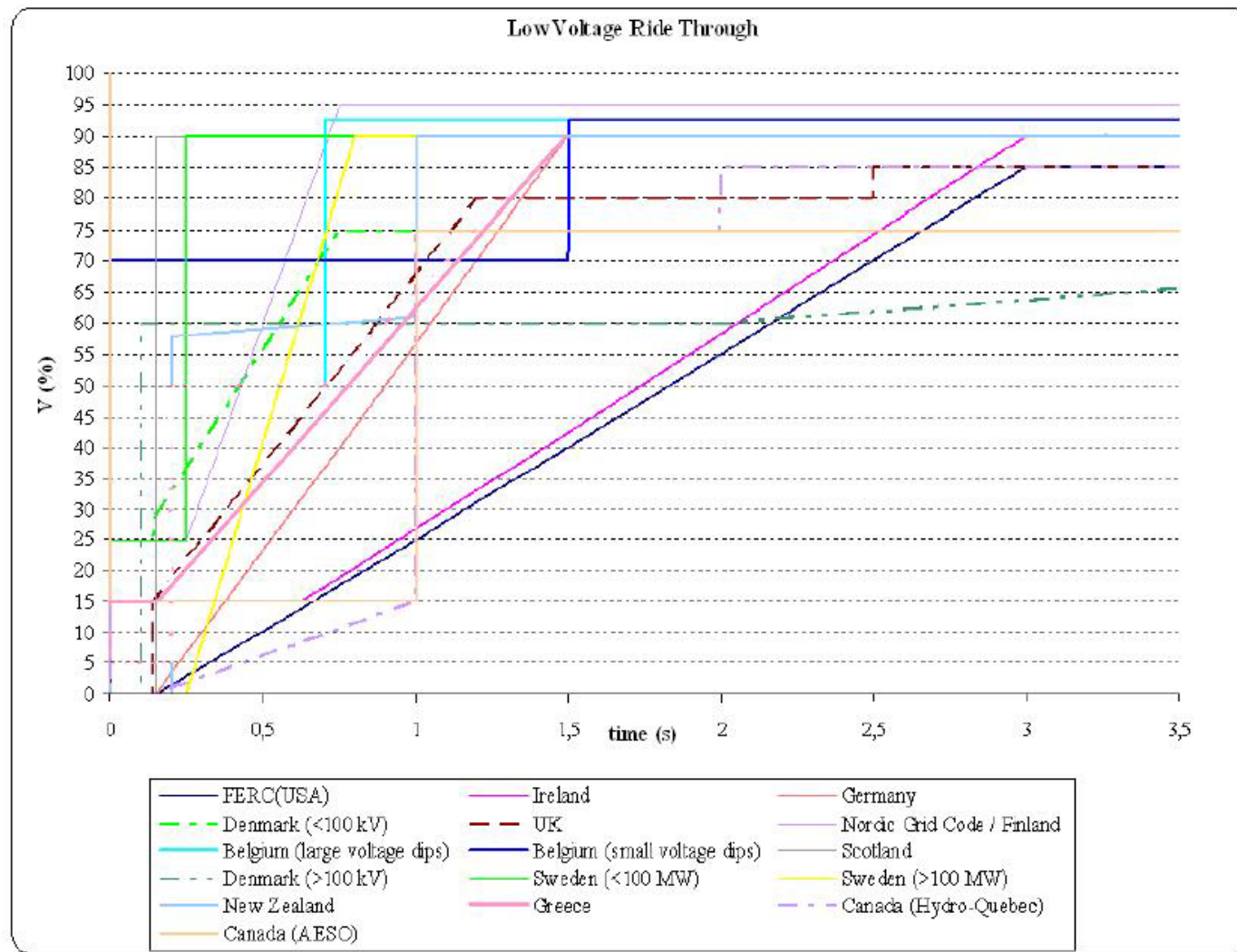


(b)



چالش‌های بکارگیری نیروگاههای بادی در شبکه

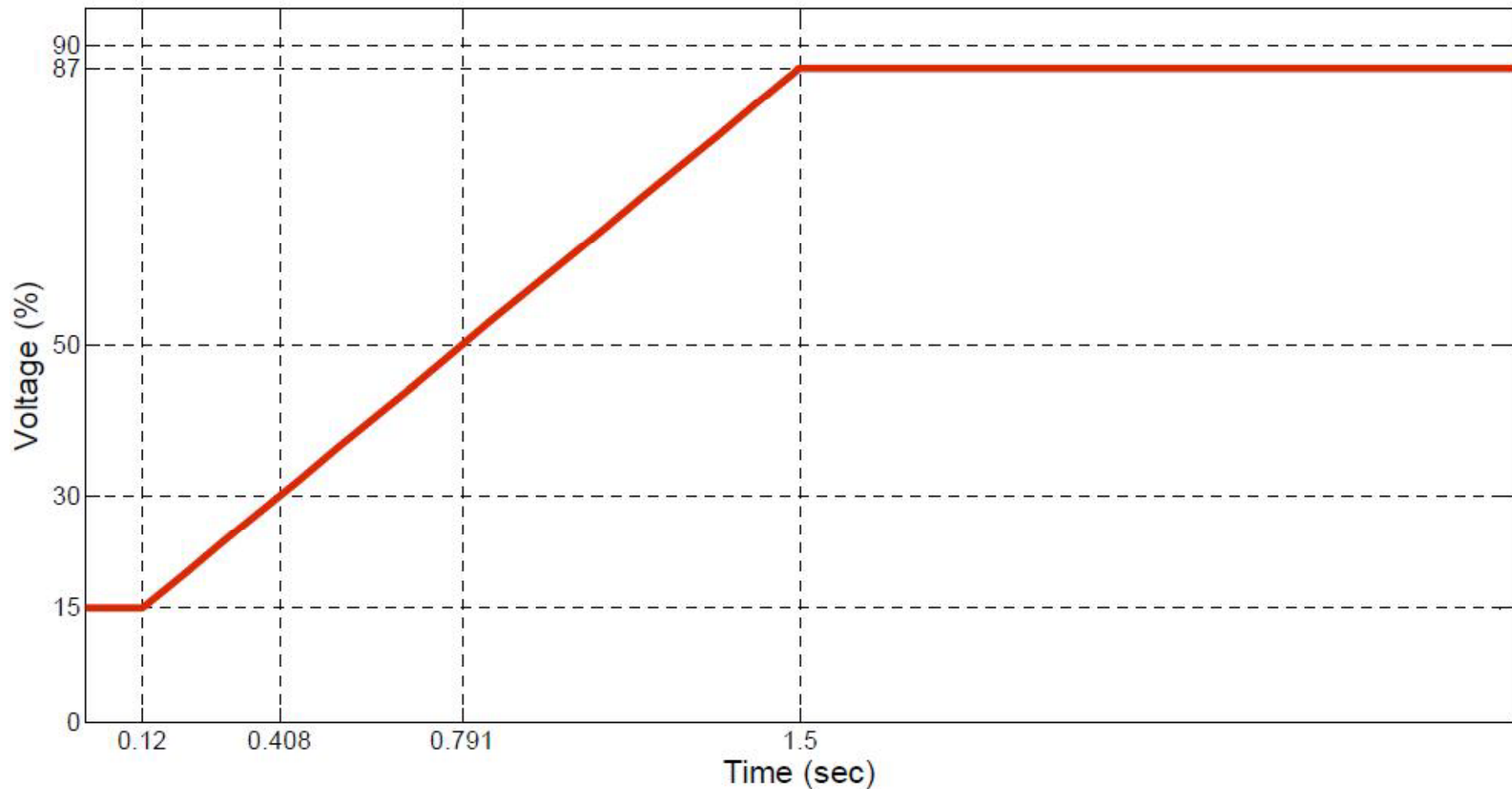
الزامات حد تحمل خطای واحد بادی برای کشورهای گوناگون





چالش‌های بکارگیری نیروگاههای بادی در شبکه

الزامات حد تحمل خطای واحد بادی طبق استاندارد ایران



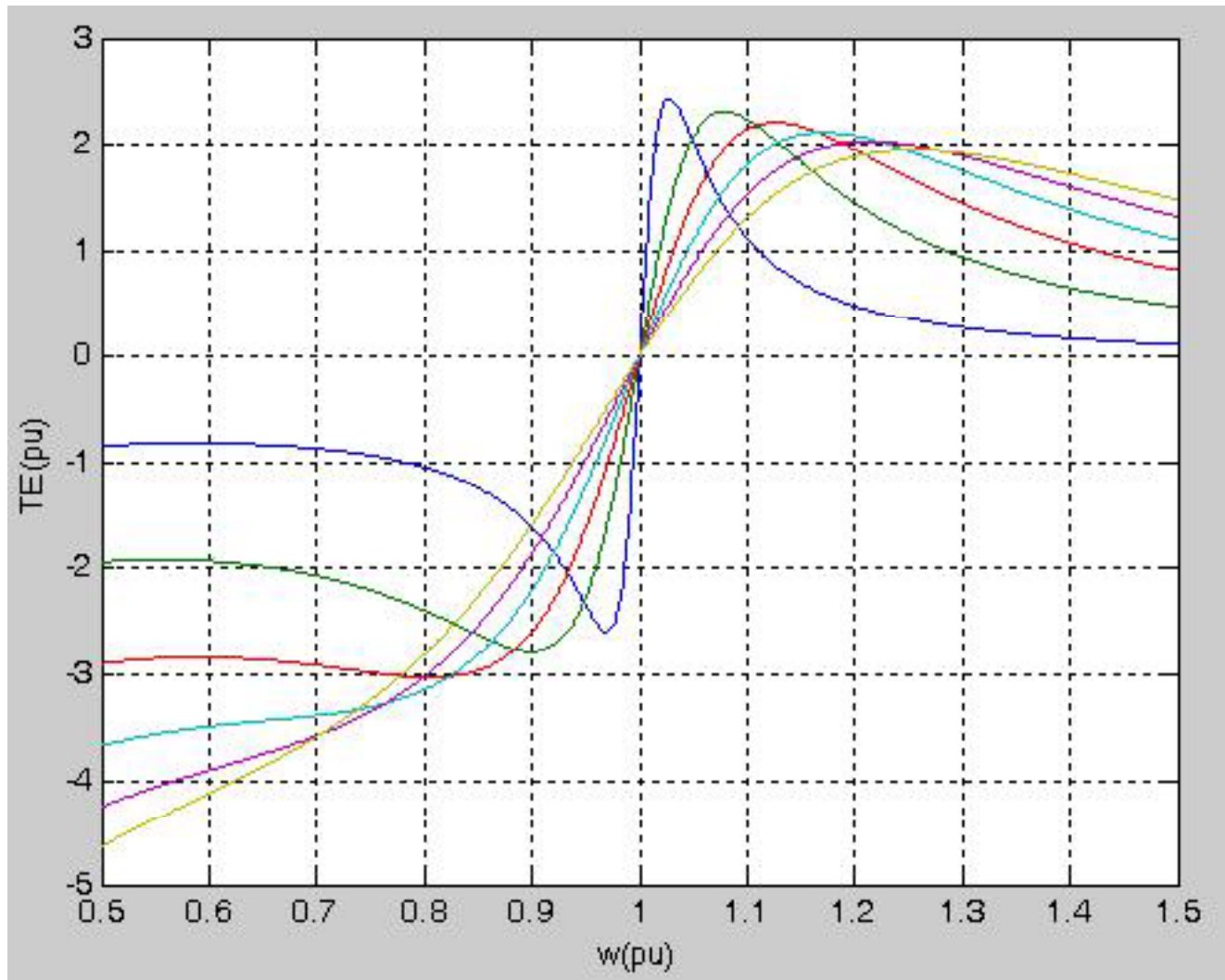


پایداری گذرای ژنراتور واحد بادی - معرفی



چالش‌های بکارگیری نیروگاههای بادی در شبکه

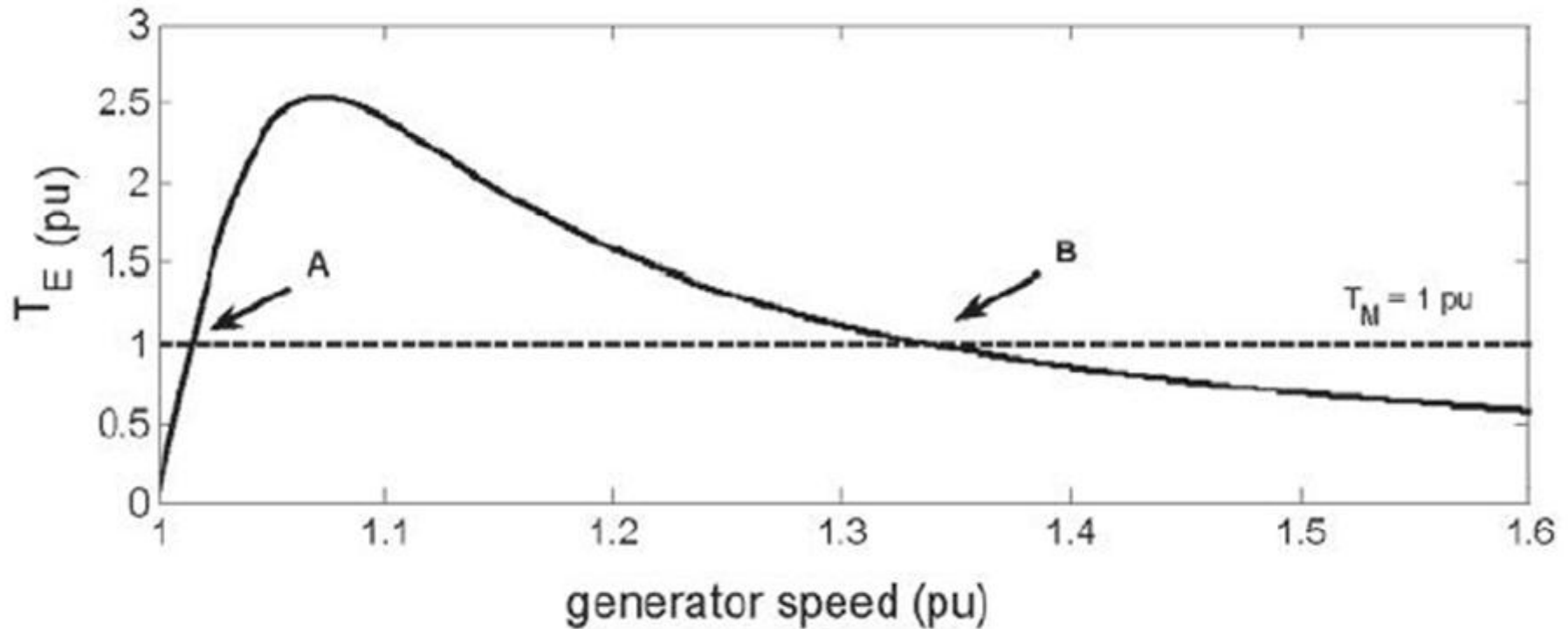
منحنی مشخصه ژنراتور القایی





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

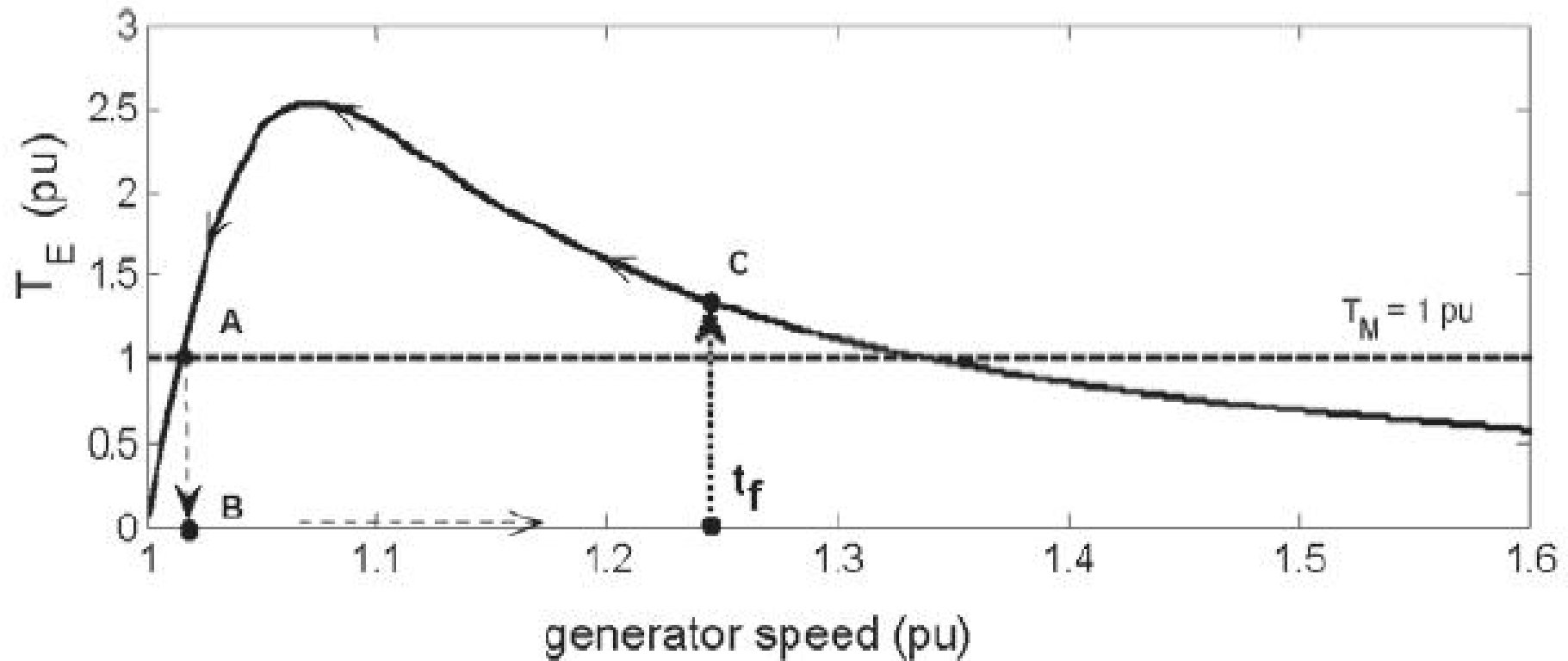
تعیین نقطه کار ژنراتور القایی در حالت پایدار





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

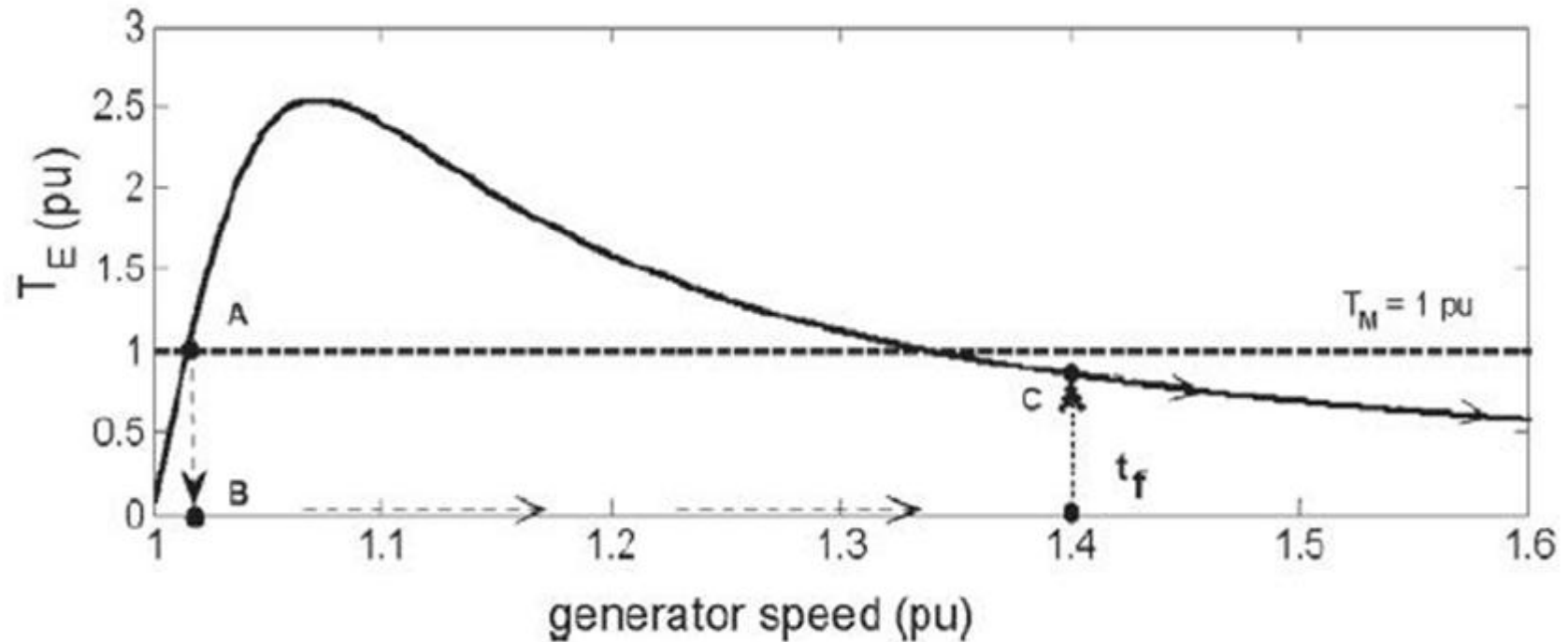
رفتار گذرای ژنراتور القایی در برابر اتصال کوتاه - حالت پایدار





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

رفتار گذرای ژنراتور القایی در برابر اتصال کوتاه – حالت ناپایدار





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

پایداری گذرای ژنراتورهای بادی – حالت پایدار و ناپایدار

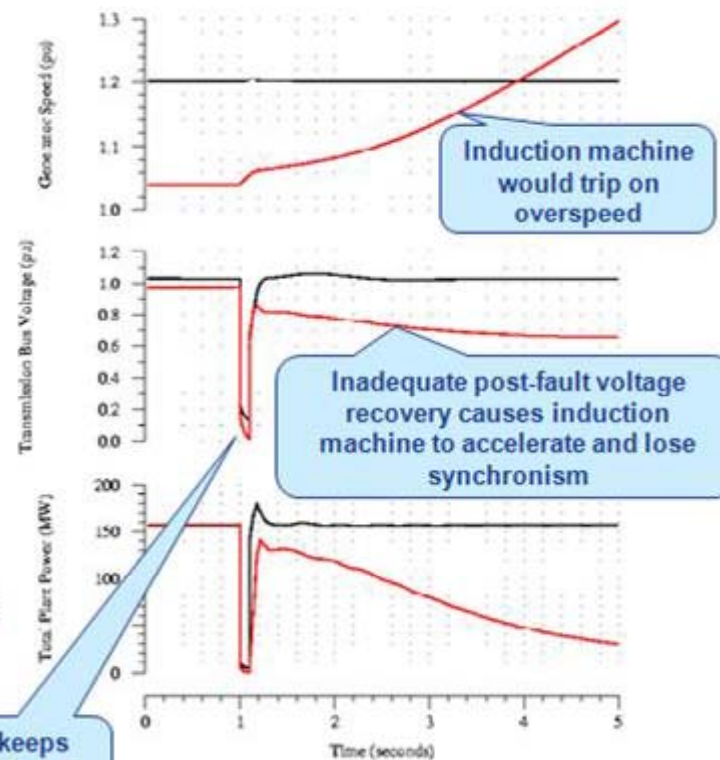
Induction vs DFG Dynamics

- Recovery of induction generators from severe faults can involve more than LVRT
- Post-fault dynamics can result in loss of synchronism and tripping
- Wind plants with power electronic enabled WTGs can be more stable (than conventional synchronous generators.)

LVRT keeps machines on during fault



6 Cycle Severe Fault on Transmission System
GE Wind Turbine (Black), Stall Regulated (Red)



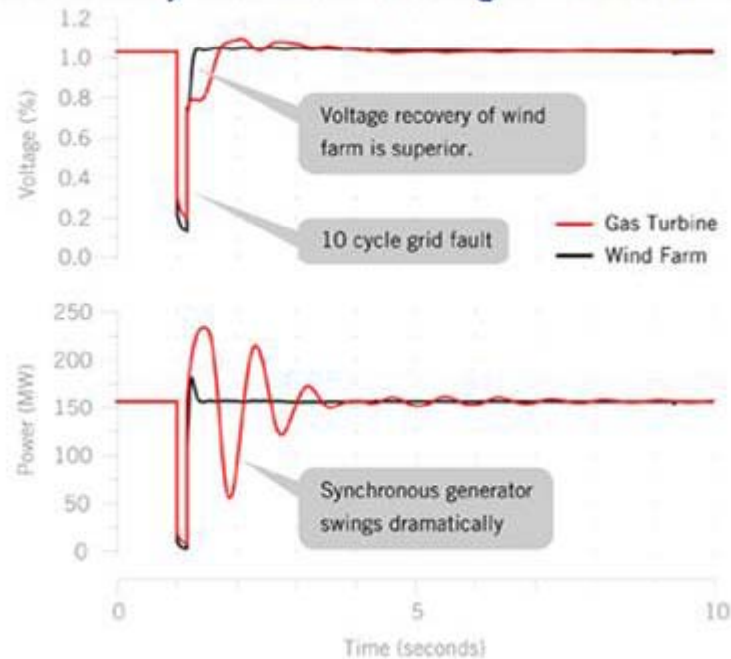


چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

پایداری گذرای ژنراتورهای بادی – مقایسه با ژنراتور سنکرون

Transient Stability

DFG wind farms are more stable than conventional synchronous generators.



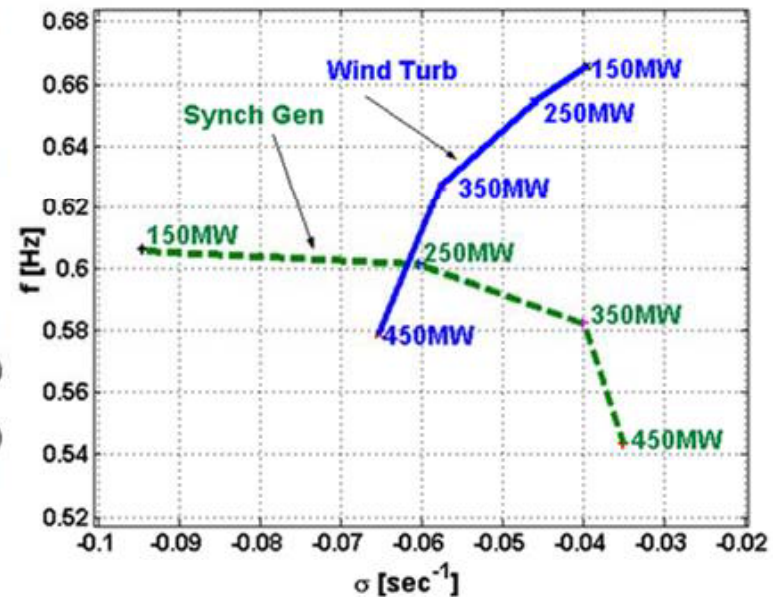
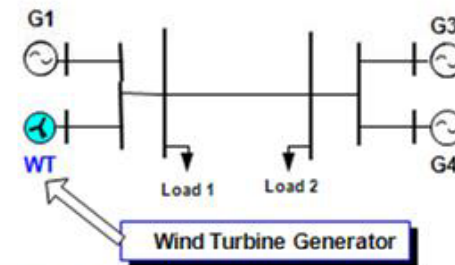
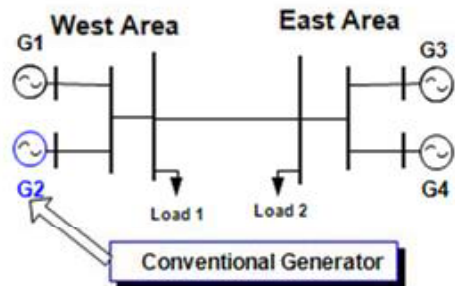


چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

پایداری دینامیک ژنراتورهای بادی

Damping

DFG wind farms don't tend to aggravate system oscillations



Copyright © 2005 IEEE



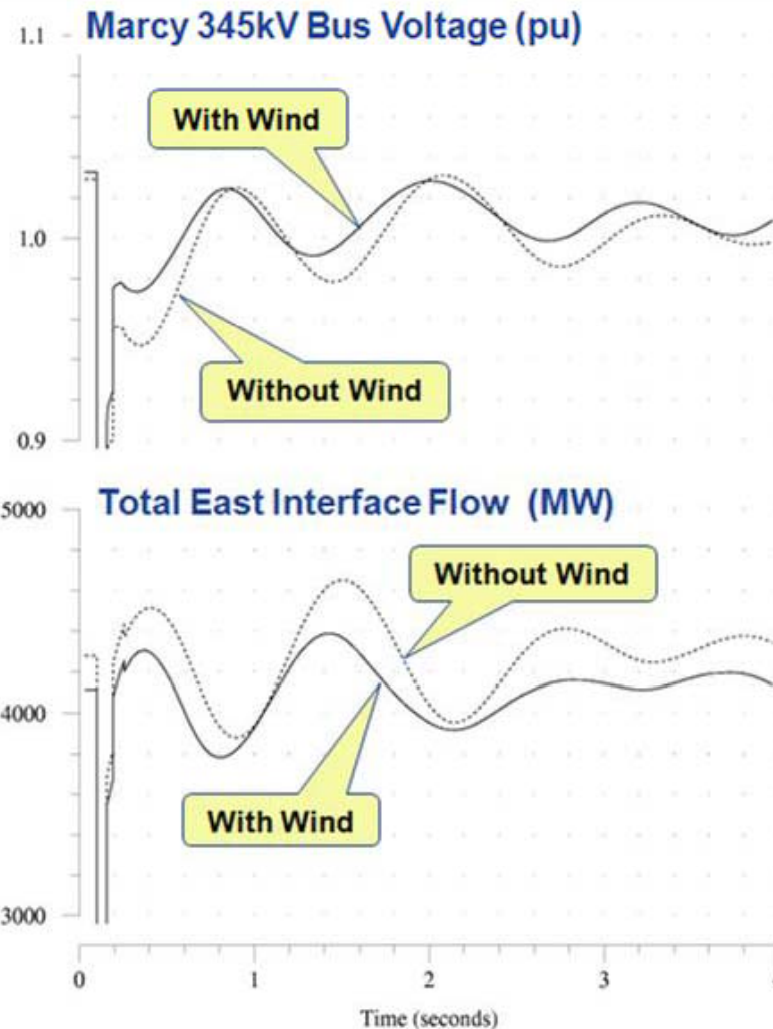


چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

پایداری دینامیک ژنراتورهای بادی

Impact of Wind Generation on System Dynamic Performance

- Fault at Marcy 345 kV bus
- Severe contingency for overall system stability
- Simulation assumes vector-controlled wind turbines
- Wind generation improves post-fault response of interconnected power grid





چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

تأثیر اینرسی واحدهای بادی بر رفتار فرکانسی شبکه

Why Inertial Response: System Needs

- Increasing Dependence on Wind Power
 - Large Grids with Significant Penetration of Wind Power
- Modern variable speed wind turbine-generators do not contribute to system inertia
- System inertia declines as wind generation displaces synchronous generators (which are de-committed)
- Result is deeper frequency excursions for system disturbances
- Increased risk of
 - Under-frequency load shedding (UFLS)
 - Cascading outages

Inertial response will increase system security and aid large scale integration of wind power: starting to be required in some systems

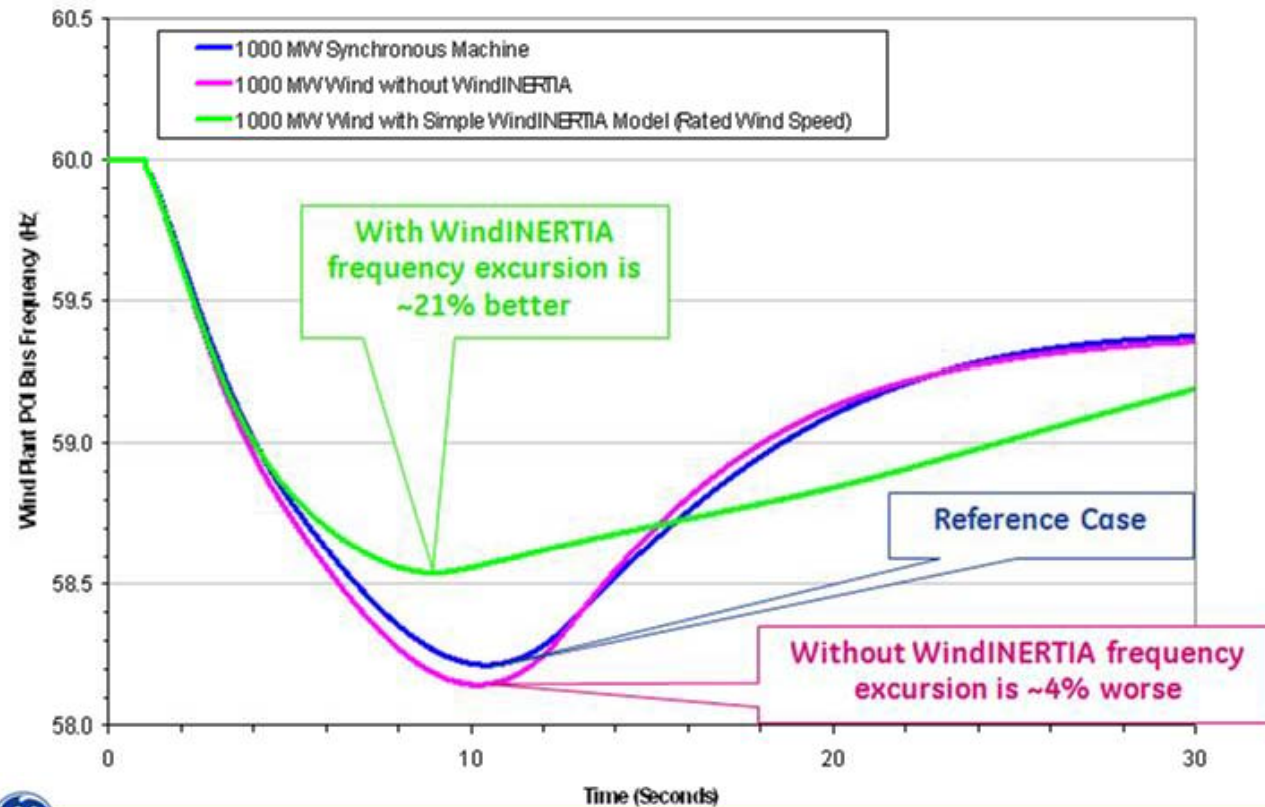




چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

تأثیر اینرسی واحدهای بادی بر رفتار فرکانسی شبکه

An Example: 14GW, mostly hydro system, for trip of a large generator



Minimum frequency is the critical performance concern for reliability

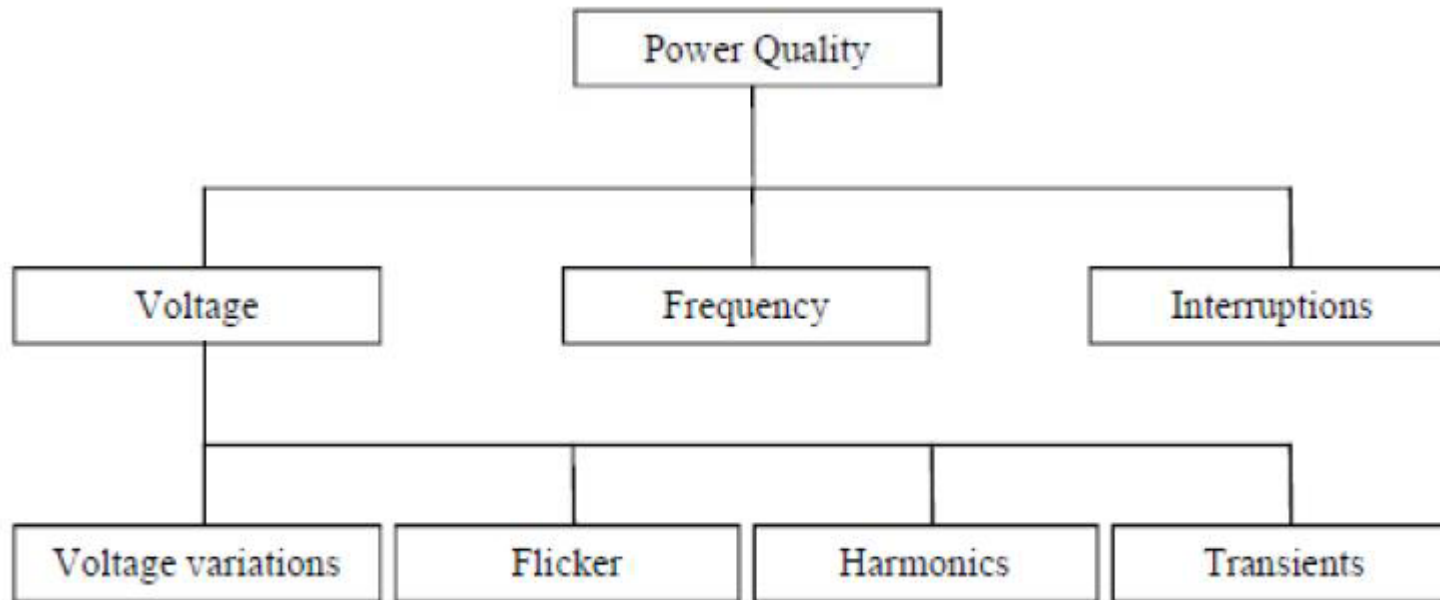


ملاحظات کیفیت توان



چالش‌های بکارگیری نیروگاه‌های بادی در شبکه

شاخه‌های مطالعات کیفیت توان با وجود نیروگاه‌های بادی





بارگذاری دینامیک خط در انتقال توان واحدهای بادی



مفهوم بارگذاری دینامیک خط – استاندارد IEEE738

$$P_j = I_{dc}^2 R_{dc} [1 + \alpha (T_{av} - 20)]$$

P_j : توان حرارتی تولیدی خط

T_{av} : دمای متوسط کاری خط

$$I_{dc} = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R_{dc} [1 + \alpha (T_{av} - 20)]}}$$

α : ضریب مقاومت حرارتی هادی

$$I_{ac} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{1.0045 + 0.09 \cdot 10^{-6} I_{dc}}}$$

P_c : حرارت دفعی جابجایی هادی

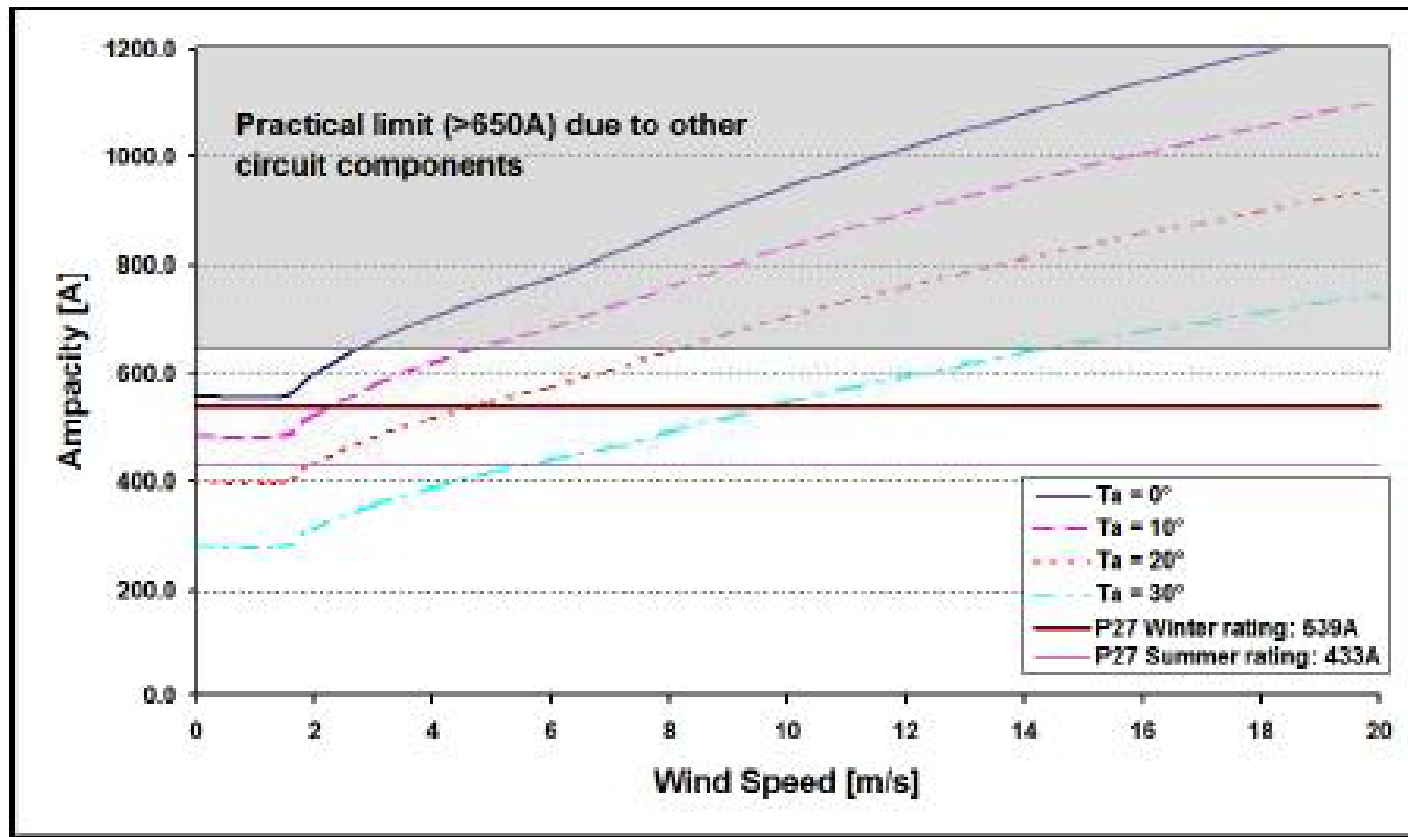
P_r : حرارت دفعی تشعشی هادی

P_s : حرارت جذبی تابشی هادی



بارگذاری دینامیک خط

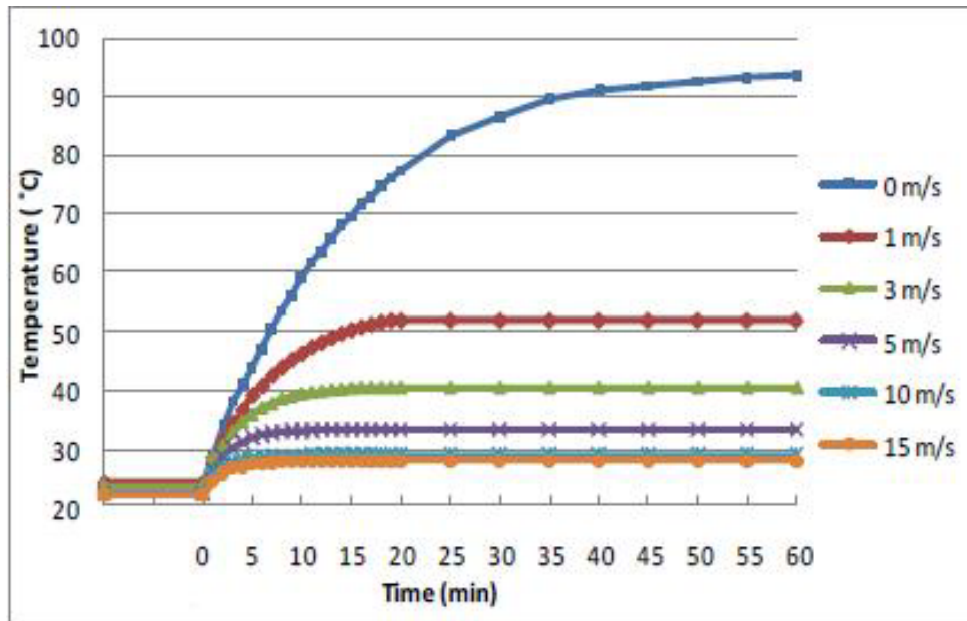
تغییرات بارگیری خط بر حسب سرعت باد



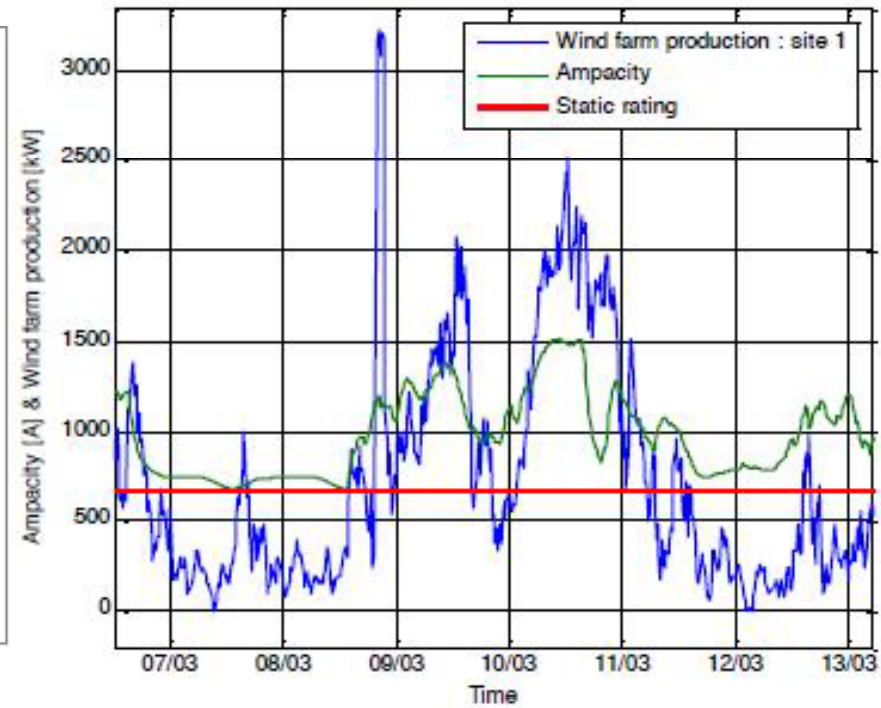


بارگذاری دینامیک خط

تغییرات بارگیری خط بر حسب سرعت باد



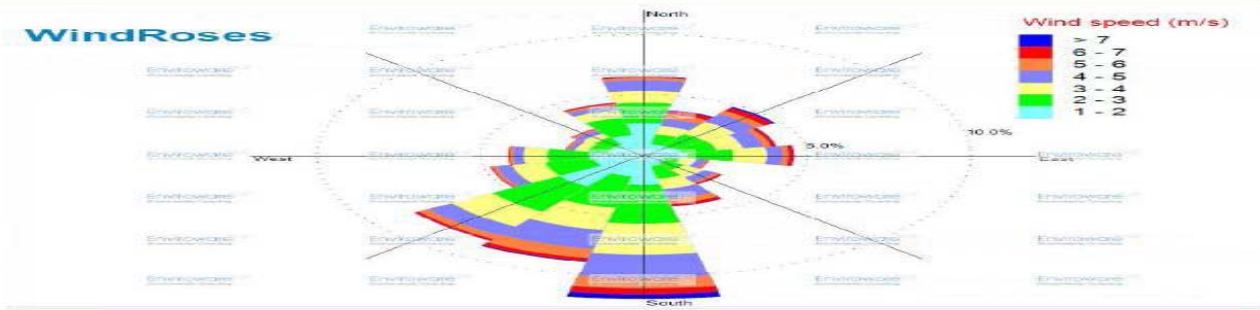
$I_c=550A$



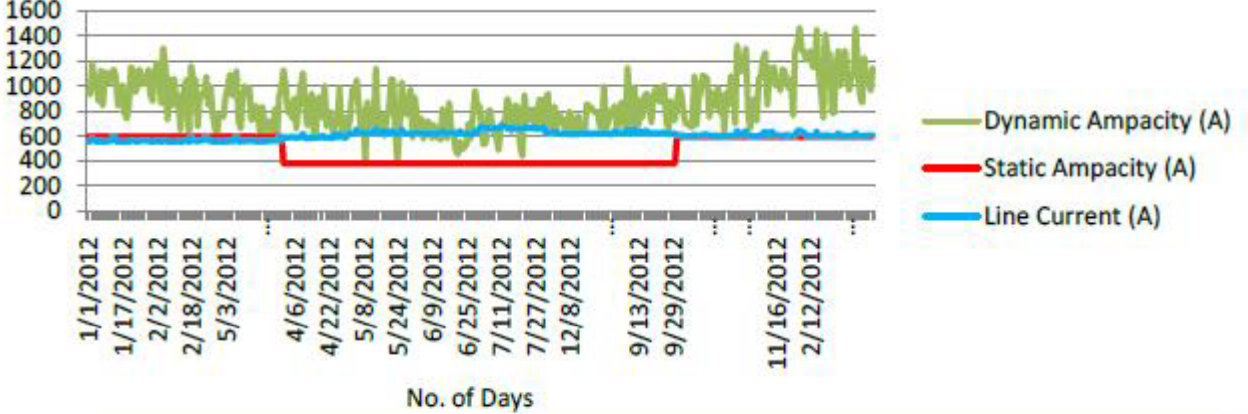
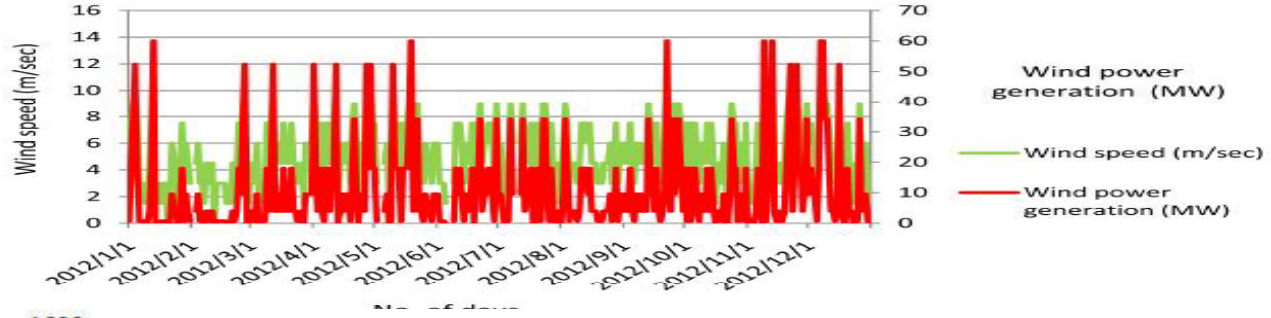


بارگذاری دینامیک خط

نمونه عملی



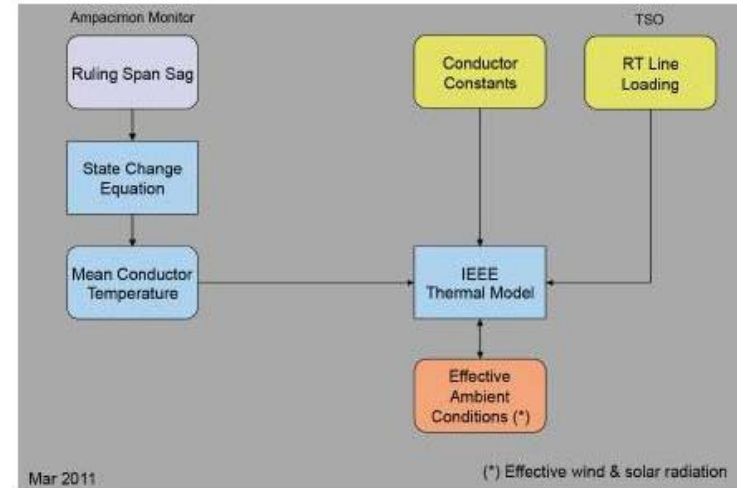
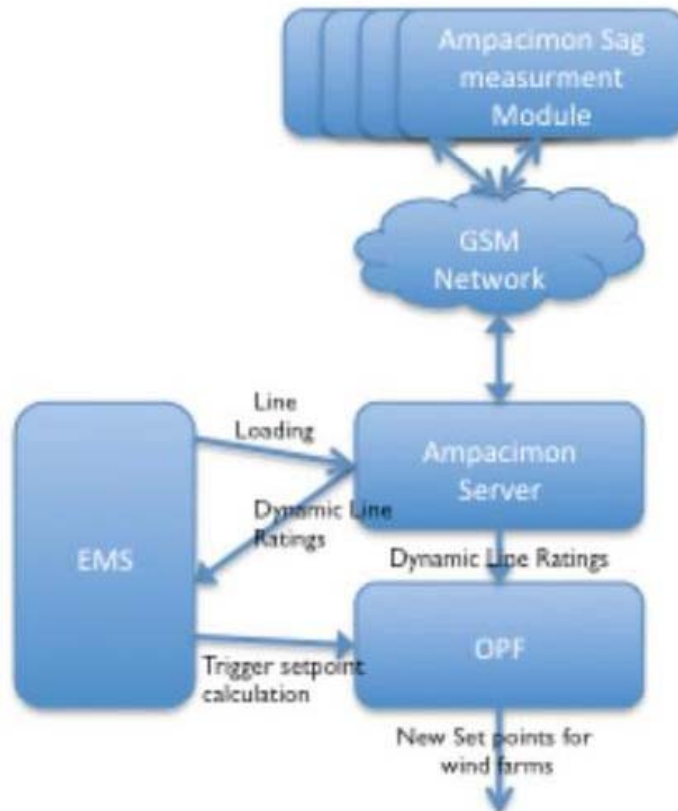
Wind Roses showing the wind direction at Stöpsjön.



Static and Dynamic Ampacities (A) versus the Line Current (A) in 2012.



بارگذاری دینامیک خط





با سپاسی

www.nri.ac.ir