



دانشکده‌ی مهندسی - گروه برق

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد برق قدرت

عنوان:

اثر حضور راهبردی نیروگاه‌های بادی بر بازار برق

استاد راهنما:

دکتر مجید علومی بایگی

تهیه‌کننده:

محسن بنائی

تابستان 1391

چکیده

ورود مزارع بادی با حجم بالا به بازار برق، فرصت‌ها و چالش‌های جدیدی را پیش روی بهره‌برداران بازار قرار داده است. از یک سو، مزایای زیست محیطی این واحدها دولت‌ها را به سمت استفاده‌ی هر چه بیشتر از این منابع سوق داده است و از دیگر سو، هزینه‌های بالا و عدم قابلیت پیش‌بینی دقیق و کنترل خروجی توربین‌های بادی، مشکلاتی را برای بهره‌بردار سیستم ایجاد می‌کند. یک دهه تحقیق در مورد توربین‌ها و ژنراتورهای بادی، هزینه‌ی ساخت نیروگاه‌های بادی را کاهش داده است. دولت‌ها مایل به کاهش یارانه‌ی پرداختی به نیروگاه‌های بادی می‌باشند. لذا در برخی کشورها برای تشویق نیروگاه‌های بادی برای شرکت راهبردی در بازار و کسب درآمد طرح حمایتی پاداش تولید، جایگزین طرح تعرفه‌ی تولید شده است. همچنین به منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از نیروگاه‌های بادی، جریمه‌ای برای خطای پیش‌بینی تولید نیروگاه‌های بادی وضع شده است تا آنها را ملزم به پیش‌بینی دقیق‌تر کرده و بستر مناسب‌تری را برای شرکت راهبردی آنها در بازار برق فراهم شود. در این پایان‌نامه اثر حضور راهبردی نیروگاه‌های بادی بر بازار برق در میان‌مدت و کوتاه‌مدت مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا طرح‌های مختلفی برای شرکت راهبردی نیروگاه‌های بادی پیشنهاد شده است. این طرح‌ها عبارتند از: الف) شرکت نیروگاه‌های بادی در بازار برق با ارائه‌ی تابع عرضه، ب) شرکت نیروگاه‌های بادی در بازار برق با ارائه‌ی توان تولیدی و ج) ادغام نیروگاه‌های بادی و نیروگاه‌های حرارتی و شرکت راهبردی آنها در بازار با ارائه‌ی تابع عرضه‌ی مشترک. در ادامه اثر شرکت راهبردی نیروگاه‌های بادی در هر یک از طرح‌های فوق بر قیمت انرژی الکتریکی و سود تولیدکنندگان انرژی الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام این مطالعات لازم است که پیشنهاد قیمت/تولید کلیه‌ی تولیدکنندگان معلوم باشد. از آنجا که پیشنهاد قیمت/تولید تولیدکنندگان نامشخص بوده و به رفتار نیروگاه‌های بادی و دیگر شرکت‌ها بستگی دارد. برای انجام مطالعات فوق فرض شده است که بازار به تعادل رسیده است. پیشنهاد قیمت/تولید هر یک از تولیدکنندگان در نقطه‌ی تعادل برای انجام مطالعات فوق استفاده شده است. با شبیه‌سازی بازار برق شبکه سی باسه IEEE، طرح‌های فوق در میان‌مدت و کوتاه‌مدت بایکدیگر مقایسه شده و طرح ادغام نیروگاه‌های بادی و غیر بادی جهت شرکت راهبردی در بازار برق بدلیل کاهش بیشتر قیمت انرژی الکتریکی و عدم کاهش سود نیروگاه‌های بادی به عنوان طرح برتر انتخاب شده است.

فهرست مطالب

0.....	فصل اول
1.....	مقدمه
1.....	1-1) انگیزه‌ها
1.....	2-1) تعریف مسئله
2.....	3-1) فرضیات مسئله
2.....	4-1) اهداف پایان‌نامه
3.....	5-1) ساختار پایان‌نامه
3.....	فصل دوم
4.....	مقدمه
4.....	1-2) نیروگاه‌های بادی، مسائل و مشکلات
4.....	1-1-2) تاریخچه
5.....	2-1-2) روند گسترش مزارع بادی در جهان
6.....	3-1-2) مزایای استفاده از توان بادی
6.....	4-1-2) معایب استفاده از توان بادی
7.....	5-1-2) حضور نیروگاه‌های بادی در بازار برق
8.....	6-1-2) هزینه‌ی عدم تعادل
11.....	7-1-2) طرح‌های حمایتی نیروگاه‌های بادی
11.....	الف) طرح تعرفه‌ی تولید
12.....	ب) طرح پاداش تولید
12.....	ج) طرح گواهی سبز و الزامات سهمیه‌ای
13.....	د) مقایسه، مزایا و معایب طرح‌های حمایتی
14.....	2-2) نقطه‌ی تعادل
16.....	3-2) مروری بر تحقیقات انجام شده
16.....	1-3-2) مروری بر مقالات

24.....	2-3-2) جمع بندی مقالات و نتیجه گیری
25.....	فصل سوم
25.....	مقدمه
26.....	1-3) نیروگاه بادی به عنوان یک واحد دریافت کننده قیمت بازار
28.....	2-3) نیروگاه بادی به عنوان بازیگر بازار و ارائه دهنده ی یک تابع عرضه برای شرکت در بازار برق
31.....	3-3) نیروگاه بادی به عنوان بازیگر بازار و ارائه دهنده ی توان پیشنهادی برای شرکت در بازار برق
35.....	4-3) نتایج شبیه سازی
35.....	1-4-3) تعیین داده های شبیه سازی
37.....	2-4-3) نتایج شبیه سازی سیستم با نیروگاه بادی به عنوان یک واحد دریافت کننده ی قیمت بازار
37.....	3-4-3) نتایج شبیه سازی سیستم با نیروگاه بادی به عنوان بازیگر و ارائه دهنده ی یک تابع عرضه برای شرکت در بازار
39.....	4-4-3) نتایج شبیه سازی سیستم در حضور نیروگاه بادی به عنوان بازیگر بازار و ارائه دهنده ی توان پیشنهادی
40.....	5-4-3) نتایج شبیه سازی مرجع [31] برای جایگزینی نیروگاه بادی با نیروگاهی دیگر
41.....	5-3) تحلیل نتایج
41.....	1-5-3) تاثیر حضور نیروگاه بادی در بازار بر نقطه ی تعادل بازار
42.....	2-5-3) تغییرات سود نیروگاه بادی و قیمت برق برای مصرف کننده در طرح های مختلف
44.....	6-3) جمع بندی فصل سوم
45.....	فصل چهارم
45.....	مقدمه
46.....	1-4) مدل سازی واحد ترکیبی نیروگاه بادی - گازی
47.....	1-1-4) ادغام نیروگاه بادی و گازی با فرض نامحدود بودن ظرفیت تولید نیروگاه گازی
51.....	2-1-4) ادغام نیروگاه بادی و گازی با فرض محدود بودن ظرفیت تولید نیروگاه گازی
55.....	2-4) نتایج شبیه سازی
55.....	1-2-4) نتایج شبیه سازی ادغام نیروگاه بادی و گازی با فرض نامحدود بودن ظرفیت نیروگاه گازی
56.....	2-2-4) نتایج شبیه سازی ادغام نیروگاه بادی و گازی با فرض محدود بودن ظرفیت نیروگاه گازی

58.....	(3-4) تحلیل نتایج
58.....	(1-3-4) مقایسه‌ی طرح‌های راهبردی نیروگاه‌های بادی
61.....	(2-3-4) واحد مناسب برای ادغام با نیروگاه بادی
63.....	(5-4) جمع‌بندی فصل چهارم
64.....	فصل پنجم
64.....	مقدمه
64.....	(1-5) بیان مسئله
65.....	(2-5) تعیین سناریوهای خطای پیش‌بینی
67.....	(3-5) نتایج شبیه‌سازی
67.....	(1-3-5) نتایج شبیه‌سازی حضور مستقل نیروگاه بادی در طرح دریافت‌کننده‌ی قیمت
68.....	(2-3-5) نتایج شبیه‌سازی حضور مستقل و راهبردی نیروگاه بادی در طرح پیشنهاد تابع عرضه
68.....	(3-3-5) نتایج شبیه‌سازی حضور مستقل و راهبردی نیروگاه بادی در طرح پیشنهاد تولید
69.....	(4-3-5) نتایج شبیه‌سازی حضور نیروگاه بادی در طرح ادغام
70.....	(4-5) تحلیل نتایج
72.....	(5-5) جمع‌بندی فصل پنجم
74.....	فصل ششم
74.....	(1-6) جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
77.....	(2-6) پیشنهادات
78.....	پیوست‌ها
78.....	پیوست الف- خلاصه مقاله‌ی مرجع [31]
78.....	الف) نقطه‌ی تعادل تابع عرضه
80.....	ب) نقطه‌ی تعادل تحت عدم قطعیت
81.....	ج) راه حل پیشنهادی
81.....	سیستم فاقد واحد دارای عدم قطعیت است و از قیود تولید واحدها صرف نظر می‌شود
83.....	سیستم فاقد واحد دارای عدم قطعیت است و قیود تولید واحدها در نظر گرفته می‌شود

84.....	سیستم شامل واحد دارای عدم قطعیت است و از قیود تولید واحدها صرف نظر می‌شود
84.....	سیستم شامل واحد دارای عدم قطعیت است و قیود تولید واحدها در نظر گرفته می‌شود
85.....	د) الگوریتم پیشنهادی برای تعیین نقطه تعادل
87.....	ه) نتایج شبیه سازی
89.....	پیوست ب- نتایج آزمون نقطه‌ی تعادل فصل سوم
89.....	الف) نتایج آزمون نقطه‌ی تعادل بخش 3-2
90.....	ب) نتایج آزمون نقطه‌ی تعادل بخش 3-3
92.....	ج) نتایج آزمون نقطه‌ی تعادل بخش 3-4
95.....	پیوست ج- نتیجه‌ی آزمون نقطه‌ی تعادل فصل چهارم
95.....	الف) نتیجه‌ی آزمون نقطه‌ی تعادل بخش 4-3-1
97.....	ب) نتیجه‌ی آزمون نقطه‌ی تعادل بخش 4-3-2
107.....	مراجع

فهرست جداول

10.....	جدول 2-1- قیمت‌گذاری عدم تعادل در بلژیک برای نیروگاه‌های off-shore
1.....	جدول 2-2- نمونه‌ای از هزینه‌ی عدم تعادل برای مقادیر مختلف انحراف تولید توان بادی و مقادیر مختلف بار
1.....	جدول 3-1- پارامترهای نیروگاه‌های حرارتی
36.....	جدول 3-2- سناریوهای تولید توان بادی و احتمال رخداد هر یک

- جدول 3-3. نتایج شبیه‌سازی حضور نیروگاه بادی در بازار برق به عنوان واحد دریافت کننده‌ی قیمت بازار.... 36
- جدول 3-4. نقطه‌ی تعادل سیستم در صورت حضور نیروگاه بادی در بازار برق به عنوان ارائه دهنده‌ی تابع عرضه
 37 ($f_{up} = 30 \$/MWh$, $f_{down} = 40 \$/MWh$)
- جدول 3-5. نقطه‌ی تعادل سیستم در حضور نیروگاه بادی در بازار برق به عنوان بازیگر ارائه دهنده‌ی تابع عرضه
 38 ($f_{up} = 25 \$/MWh$, $f_{down} = 45 \$/MWh$)
- جدول 3-6. نقطه‌ی تعادل سیستم در حضور نیروگاه بادی در بازار برق به عنوان بازیگر ارائه دهنده‌ی تابع عرضه
 38 ($f_{up} = 25 \$/MWh$, $f_{down} = 50 \$/MWh$)
- جدول 3-7. نقطه‌ی تعادل سیستم در حضور نیروگاه بادی در بازار برق به عنوان بازیگر ارائه دهنده‌ی توان
 پیشنهادی 38 ($f_{up} = 30 \$/MWh$, $f_{down} = 40 \$/MWh$)
- جدول 3-8. نقطه‌ی تعادل سیستم در حضور نیروگاه بادی در بازار برق به عنوان بازیگر ارائه دهنده‌ی توان
 پیشنهادی 39 ($f_{up} = 25 \$/MWh$, $f_{down} = 45 \$/MWh$)
- جدول 3-9. نقطه‌ی تعادل سیستم در حضور نیروگاه بادی در بازار برق به عنوان بازیگر ارائه دهنده‌ی توان
 پیشنهادی 39 ($f_{up} = 25 \$/MWh$, $f_{down} = 50 \$/MWh$)
- جدول 3-10. مقایسه‌ی درآمد نیروگاه بادی و هزینه کل بهره‌بردار شبکه در طرح‌های مختلف..... 40
- جدول 3-11. مقایسه‌ی هزینه‌ی کل بهره‌بردار و تغییرات قیمت بازار با در نظر گرفتن طرح پاداش تولید..... 43
- جدول 4-1. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و گازی با فرض ظرفیت نامحدود نیروگاه گازی و بار
 250 مگاوات..... 55
- جدول 4-2. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و گازی با فرض ظرفیت نامحدود نیروگاه گازی و بار
 150 مگاوات..... 56
- جدول 4-3. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و گازی با فرض ظرفیت نامحدود نیروگاه گازی و بار
 320 مگاوات..... 56
- جدول 4-4. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و نیروگاه گازی 30 مگاواتی با هزینه‌ی عدم تعادل
 منفی 40 دلار بر مگاوات ساعت 56
- جدول 4-5. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و نیروگاه گازی 30 مگاواتی با هزینه‌ی عدم تعادل
 منفی 45 دلار بر مگاوات ساعت..... 57
- جدول 4-6. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و نیروگاه گازی 30 مگاواتی با هزینه‌ی عدم تعادل
 منفی 50 دلار بر مگاوات ساعت..... 57

جدول 4-7. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و نیروگاه گازی 50 مگاواتی با هزینه‌ی عدم تعادل منفی 40 دلار بر مگاوات ساعت.....	57
جدول 4-8. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و نیروگاه گازی 50 مگاواتی با هزینه‌ی عدم تعادل منفی 45 دلار بر مگاوات ساعت.....	57
جدول 4-9. نقطه‌ی تعادل بازار در حالت ادغام نیروگاه بادی و نیروگاه گازی 50 مگاواتی با هزینه‌ی عدم تعادل منفی 50 دلار بر مگاوات ساعت.....	57
جدول 4-10. قیمت بازار برق در نقطه‌ی تعادل بازار در ظرفیت‌های مختلف نیروگاه گازی، برای هزینه‌ی عدم تعادل منفی 40، 45 و 50 دلار بر مگاوات ساعت.....	58
جدول 4-11. سود نیروگاه گازی در نقطه‌ی تعادل بازار با فرض ظرفیت‌های مختلف، برای هزینه‌ی عدم تعادل منفی 40، 45 و 50 دلار بر مگاوات ساعت.....	58
جدول 4-12. مقایسه‌ی سود نیروگاه بادی و گازی در ساختارهای مختلف حضور نیروگاه بادی و گازی در بازار برق.....	59
جدول 4-13. محاسبه‌ی هزینه‌ی بهره‌بردار سیستم و قیمت برق برای مصرف‌کننده در صورت اجرای طرح پاداش تولید برای افزایش درآمد نیروگاه بادی.....	60
جدول 4-14. نقطه‌ی تعادل هنگام ادغام نیروگاه بادی با سایر واحدهای سیستم مورد مطالعه با فرض ظرفیت نامحدود واحد تحت قرار داد.....	61
جدول 5-1. قیمت‌های نقطه‌ی تعادل و مجموع سود نیروگاه بادی و گازی در سناریوهای مختلف توان تولیدی نیروگاه بادی در طرح دریافت‌کننده‌ی قیمت.....	67
جدول 5-2. قیمت‌های نقطه‌ی تعادل و مجموع سود نیروگاه بادی و گازی در سناریوهای مختلف توان تولیدی نیروگاه بادی در طرح پیشنهاد تابع عرضه.....	68
جدول 5-3. قیمت‌های نقطه‌ی تعادل و مجموع سود نیروگاه بادی و گازی در سناریوهای مختلف توان تولیدی بادی در صورت حضور راهبردی نیروگاه بادی در بازار برق با ارائه‌ی مقدار توان.....	68
جدول 5-4. قیمت نقاط تعادل و سود واحد ترکیبی بادی و گازی در سناریوهای مختلف توان تولیدی نیروگاه بادی.....	69
جدول 5-5. توان متوسط و سود متوسط هر یک از بازیگران در صورت ادغام نیروگاه بادی و نیروگاه گازی و اعمال پیش‌بینی.....	69
جدول 5-6. سود واحد بادی و گازی و هزینه‌ی مصرف‌کنندگان در طرح‌های مربوط به حضور مستقل نیروگاه بادی در بازار برق.....	70

جدول 5-7. هزینه‌ی کل و قیمت برق برای مصرف‌کنندگان با حمایت نیروگاه بادی در طرح‌های مختلف حضور نیروگاه بادی با فرض اعمال پیش‌بینی تولید توان بادی.....	71
جدول 5-8. حداکثر ظرفیت لازم برای نیروگاه گازی، به منظور حذف عدم تعادل در سناریوهای مختلف.....	72
جدول 1-ج. سناریوهای تولید توان بادی برای تمامی سناریوهای پیش‌بینی تولید توان.....	101
جدول 2-ج-21. احتمال رخداد سناریوهای مختلف تولید توان بادی در صورت پیش‌بینی تولید صفر تا 60 مگاوات.....	105-101

فهرست تصاویر

شکل 2-1. میزان تولید توان بادی در جهان در بیست سال اخیر.....	5
شکل 2-2. تابع هزینه‌ی حدی (تابع عرضه‌ی حقیقی) و منحنی پیشنهادی.....	15
شکل 2-3. فرایند رسیدن بازار برق به نقطه‌ی تعادل.....	15
شکل 3-1. فرایند نمونه‌گیری از توان بادی.....	35
شکل 5-1. تابع توزیع احتمال بتا برای پیش‌بینی تولید 0/1 و 0/7 توان نرمالایز شده.....	66
شکل 5-2. انحراف معیار یک مزرعه‌ی بادی به عنوان تابعی از توان نرمالایز شده پیش‌بینی شده برای بازه‌های زمانی مختلف پیش‌بینی.....	66

87.....	شکل 1-الف. بلوک دیاگرام الگوریتم یافتن نقطه‌ی تعادل سیستم تحت عدم قطعیت.
93-88.....	شکل 1-ب- 28-ب. نتایج آزمون نقطه‌ی تعادل فصل سوم
100-94.....	شکل 1-ج- 36-ج. نتایج آزمون نقطه‌ی تعادل فصل چهارم.

فصل اول

انگیزه‌ها، اهداف و تعریف مسئله

مقدمه

امروزه شاهد رشد قابل توجهی در استفاده از منابع تجدیدپذیر و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک مانند باد، خورشید، زمین‌گرمایی، آبی و ... هستیم. اکثر کشورهای جهان در برنامه‌های بلند مدت صنعت برق خود، استفاده‌ی روزافزون از این منابع را در دستور کار قرار داده‌اند. از میان منابع تجدیدپذیر، باد سهم ویژه‌ای در تامین انرژی الکتریکی دارد و تکنولوژی ساخت توربین‌های بادی روز به روز در حال رشد است. حضور نیروگاه‌های بادی در سیستم قدرت، فرصت‌ها و چالش‌های جدیدی را پیش روی بازیگران بازار برق قرار داده است. تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌ی شناخت، بررسی و رفع موانع حضور نیروگاه‌های بادی در سیستم قدرت و افزایش کارایی این نیروگاه‌ها انجام شده است. مهمترین هدف این مطالعات، افزایش سود و یا کاهش هزینه‌ی عدم تعادل نیروگاه بادی بوده است. در این پایان‌نامه روش‌های مختلف حضور نیروگاه‌های بادی در بازار برق، در بازه‌ی زمانی میان‌مدت و کوتاه‌مدت مطالعه می‌شود. در ادامه‌ی این فصل مسئله تعریف و فرضیات و اهداف انجام پایان‌نامه بیان می‌شود.

1-1 انگیزه‌ها

در سال‌های اخیر تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع تجدیدپذیر گسترش یافته است. انرژی بادی از جمله‌ی مهمترین منابع تجدیدپذیر می‌باشد. در گذشته هزینه‌ی تولید انرژی الکتریکی از نیروگاه‌های بادی خیلی بیشتر

از سایر نیروگاه‌ها بود. از این رو، مزارع بادی عمدتاً توسط دولت اداره می‌شدند. با پیشرفت تکنولوژی هزینه‌ی ساخت نیروگاه‌های بادی کاهش یافت و دولت‌ها با در نظر گرفتن طرح‌های حمایتی مناسب زمینه‌ی فعالیت بخش خصوصی در زمینه‌ی احداث نیروگاه‌های بادی را فراهم آوردند. حمایت‌های دولتی به مرور زمان در حال کاهش می‌باشد. از این رو مالکان نیروگاه‌های بادی به منظور کسب سود بیشتر خواستار حضور فعال در بازار برق می‌باشند. شرکت راهبردی نیروگاه‌های بادی بر رفتار شرکت‌کنندگان دیگر تاثیر گذاشته و لذا می‌تواند بازار برق را تحت تاثیر قرار دهد. از این رو ارزشمند است تا اثر حضور راهبردی نیروگاه‌های بادی در بازار برق مورد مطالعه قرار گرفته و ساختار مناسب برای شرکت راهبردی آنها در بازار برق تعیین شود.

1-2) تعریف مسئله

یک بازار برق را در نظر می‌گیریم که تولیدکنندگان برای کسب سود بیشتر با یکدیگر رقابت می‌کنند. فرض کنید در این سیستم مقدار قابل توجهی نیروگاه بادی نصب شده است و نیروگاه‌های بادی مایل به شرکت راهبردی در بازار می‌باشند. هدف این پایان‌نامه ارائه‌ی طرحی مناسب برای شرکت راهبردی نیروگاه‌های بادی در بازار برق و بررسی اثر راهبردی نیروگاه‌های بادی بر قیمت انرژی الکتریکی برای مصرف‌کنندگان و سود شرکت‌های تولیدکننده در بازه‌ی زمانی میان‌مدت و کوتاه‌مدت می‌باشد.

1-3) فرضیات مسئله

فرضیات مسئله را می‌توان به طریق زیر مطرح کرد:

1. شبکه‌ای شامل نیروگاه‌های سوخت فسیلی، مزارع بادی با ظرفیت بالا و مصرف‌کنندگان در نظر گرفته می‌شود.
2. فرض می‌شود سیستم به صورت تجدید ساختار یافته اداره می‌شود، از قیود شبکه انتقال و تلفات صرف نظر شده و قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی به صورت یکنواخت¹ می‌باشد
3. نیروگاه‌ها برای شرکت در بازار تابع عرضه‌ی خود را به بهره‌بردار پیشنهاد می‌دهند. فرض می‌شود که تابع عرضه هر واحد دارای شیب ثابت و برابر با شیب هزینه‌ی حدی آن واحد می‌باشد. تولیدکنندگان، برای حداکثر کردن سود خود، عرض از مبدا تابع عرضه پیشنهادی را تغییر می‌دهند.
4. مسئله در افق زمانی میان‌مدت و کوتاه مدت مورد بررسی قرار گرفته است. افق زمانی میان‌مدت بدین معنی است که یک ساعت مشخص از بازار برق در آینده‌ی میان مدت (چند سال بعد) مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین اطلاعات کافی از سرعت وزش باد در اختیار نیست و تنها تابع توزیع سرعت باد موجود می‌باشد. در بازه‌ی زمانی کوتاه مدت، اطلاعات مربوط به پیش‌بینی تولید توان بادی نیز موجود می‌باشد.

¹ -uniform

5. در صورت شرکت تولیدکننده‌های توان بادی در بازار روز قبل، بهره‌بردار سیستم از واحدهای تنظیم-کننده‌ی توان خود برای حذف عدم تعادل ناشی از خطای پیش‌بینی نیروگاه‌های بادی استفاده می‌کند. هزینه‌ی عدم تعادل بر عهده‌ی نیروگاه‌های بادی می‌باشد.
6. هزینه‌ی بهره‌بردار مستقل سیستم شامل هزینه‌ی خرید انرژی الکتریکی و هزینه‌ی عدم تعادل، توسط مصرف‌کنندگان به عنوان خدمات جانبی به بهره‌بردار پرداخت می‌شود. بنابراین در این پایان‌نامه، هر گاه صحبت از هزینه‌ی بهره‌بردار است، منظور هزینه‌ی کل پرداختی توسط مصرف‌کنندگان است.
- در این پایان‌نامه اثر تغییرات بوجود آمده تحت این شرایط را بر قیمت‌های بازار برق، هزینه‌ی کل بهره‌بردار و در نتیجه قیمت برق برای مصرف‌کننده بررسی می‌کنیم.

1-4) اهداف پایان‌نامه

اهداف اصلی این پایان‌نامه مطابق زیر است:

1. ارائه طرح‌هایی مناسب برای شرکت راهبردی نیروگاه‌های بادی در بازار برق.
2. بررسی اثر حضور راهبردی نیروگاه‌های بادی بر بازار برق.

1-5) ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم، مفاهیم اولیه‌ی مربوط به نیروگاه‌های بادی و حضور آن‌ها در بازار برق بیان و تعدادی از مقالات مرتبط با این موضوع به صورت مختصر بررسی می‌شوند. در فصل سوم طرح‌های حضور مستقل نیروگاه بادی در بازار برق ارائه و نتایج شبیه‌سازی، مقایسه و تحلیل می‌شود. در فصل چهارم، به بررسی طرح ادغام نیروگاه بادی با یک نیروگاه حرارتی واکنش سریع می‌پردازیم. این فصل از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. در بخش اول طرح ادغام نیروگاه بادی و حرارتی، شبیه‌سازی و تحلیل می‌شود. در بخش دوم تاثیر تغییر پارامترهای نیروگاه حرارتی ادغام شده با نیروگاه بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در فصل پنجم اثر پیش‌بینی روزانه‌ی تولید توان بادی بر سود هر یک از بازیگران، قیمت تسویه‌ی بازار برق و قیمت برق برای مصرف‌کننده برای تمامی طرح‌های ارائه شده در فصل سوم و چهارم بررسی می‌شود. سپس جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود و در انتهای پایان‌نامه پیوست‌ها که شامل بررسی دقیق معادلات و الگوریتم رسیدن به نقطه‌ی تعادل، نتایج آزمون نقاط تعادل برای شبیه‌سازی‌های انجام شده در فصل‌های دوم تا چهارم و داده‌های مربوط به سناریوهای خطای پیش‌بینی تولید می‌باشد، ارائه شده است.

فصل دوم

مفاهیم اولیه و مروری بر تحقیقات انجام شده

مقدمه

این فصل از دو بخش اصلی تشکیل شده است. در بخش اول، مفاهیم اولیه‌ی مرتبط با نیروگاه بادی و حضور آن در بازار برق بیان می‌شود. این مفاهیم شامل معرفی روند رشد تولید توان بادی در جهان، مزایا و معایب تولید توان بادی، معرفی مفهوم هزینه‌ی عدم تعادل و تعریف نقطه‌ی تعادل بازار برق می‌باشند. سپس در بخش دوم، تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی حضور نیروگاه‌های بادی در بازار برق، به طور خلاصه مرور می‌شوند. مهمترین عناوینی که در این بخش روی آن تمرکز می‌شود، نحوه‌ی محاسبه‌ی هزینه‌ی عدم تعادل در بازارهای مختلف، حداقل کردن عدم تعادل، تسویه حساب عدم تعادل، راهبرد بهینه پیشنهاددهی نیروگاه‌های بادی و تاثیر شرکت این واحدها در بازار برق بر نقطه تعادل بازار برق می‌باشند.

1-2) نیروگاه‌های بادی، مسائل و مشکلات

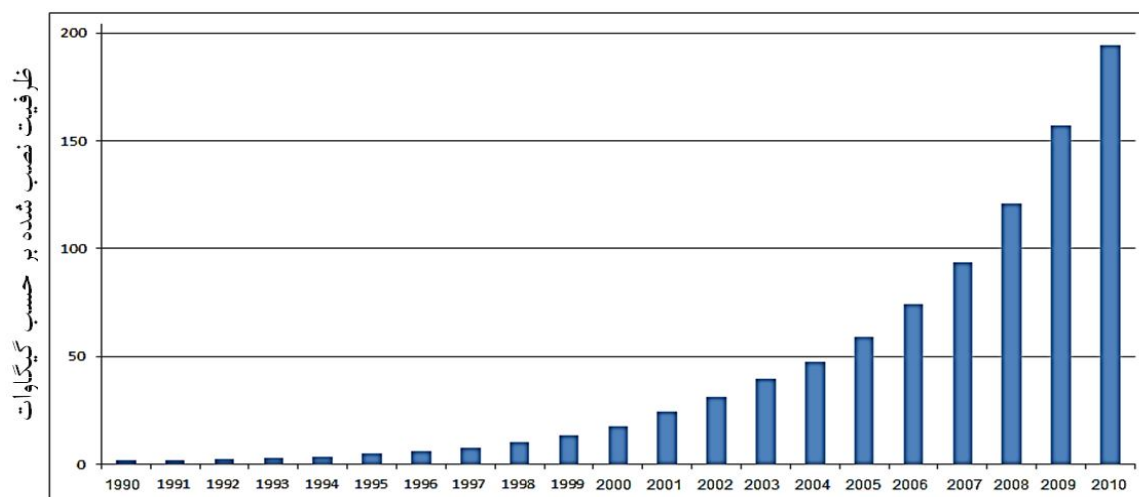
1-1-2) تاریخچه

بیش از 5500 سال است که بشر از انرژی باد برای تامین نیازهای خود استفاده می‌کند. اولین استفاده‌ی بشر از انرژی باد، به تامین انرژی لازم برای حرکت کشتی‌ها و بعدها تهویه‌ی هوای ساختمان‌ها برمی‌گردد. از قرن هفدهم میلادی اولین توربین‌های بادی برای آس‌های بادی نصب شد. از این توربین‌ها برای پمپ آب و آسیاب حبوبات استفاده می‌کردند. استفاده از باد برای تولید انرژی الکتریکی از قرن نوزدهم آغاز شد. در سال 1887، پروفیسور

جیمز بلیس² آزمایش‌هایی در این زمینه انجام داد. چارلز اف. براش³ در ایالات متحده در سال 1888 یک مولد توان بادی ساخت که برق مورد نیاز منزل و آزمایشگاه وی را تا سال 1900 تامین می‌کرد. در دهه‌ی 1890، دانشمندان دانمارکی و مخترعی به نام پاول لاکور⁴ توربین‌های بادی را برای تولید انرژی الکتریکی ساختند. در نیمه اول قرن بیستم، توربین‌های بادی کوچک برای تامین روشنایی روستاهای دور افتاده مورد استفاده قرار گرفت. واحدهای بزرگتری نیز برای اتصال به شبکه‌ی توزیع طراحی شد. واحد 1/25 مگاواتی نصب شده در ورمونت⁵ در سال 1941 از این جمله است. صنعت توان بادی مدرن در سال 1979 از دانمارک آغاز شد. ظرفیت توربین‌های بادی ساخته شده توسط شرکت‌های دانمارکی در مقایسه با امروز خیلی کم بود و هر یک تنها قادر به تولید 20 تا 30 کیلو وات توان بودند. از آن پس، کشورهای مختلفی به ساخت توربین‌های بادی ظرفیت بالا روی آوردند و با گذشت زمان توربین‌هایی با اندازه‌های خیلی بزرگتر ساخته شد [1]. بزرگترین توربینی که تاکنون ساخته شده 7 مگاوات ظرفیت دارد. طول هر یک از پره‌های این توربین حدود 80 متر است [2]. هزینه‌ی ساخت توربین‌های بادی نیز به مرور زمان کاهش یافته به طوری که این هزینه نسبت به بیست سال پیش 80 درصد کم‌تر شده است [3].

2-1-2 روند گسترش مزارع بادی در جهان

در حال حاضر منابع تجدیدپذیر حدود 18 درصد از توان الکتریکی مورد نیاز جهان را تامین می‌کنند. در این میان نیروگاه‌های آبی بیشترین سهم را به خود اختصاص می‌دهند و پس از آن نیروگاه‌های بادی در رتبه‌ی دوم قرار دارند [4]. تمایل کشورها در جهان به استفاده از انرژی باد طی سال‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته است. نمودار شکل 2-1 ظرفیت نصب شده‌ی توان بادی در جهان را از سال 1990 تا 2010 نشان می‌دهد.



شکل 2-1- میزان تولید توان بادی در جهان در بیست سال اخیر

² - Professor James Blyth

³ - Charles F. Brush

⁴ - Poul la Cour

⁵ - Vermont

ظرفیت تولید توان بادی در سال 1990، برابر 1/743 گیگاوات بوده که در سال 2010 به 194 گیگاوات رسیده است. برآورد می‌شود تا سال 2013، 200 گیگاوات دیگر به این میزان اضافه شود. [5]. حدود دو درصد انرژی الکتریکی تولیدی جهان در سال 2010 توسط توربین‌های بادی تولید شده است و طبق پیش‌بینی‌های انجام شده، تا سال 2020 حدود دوازده درصد انرژی الکتریکی جهان و 20 درصد انرژی مورد نیاز قاره‌ی اروپا از انرژی بادی تامین خواهد شد [6].

3-1-2 مزایای استفاده از توان بادی [7]

نیاز روزافزون به انرژی از یک سو و محدودیت منابع انرژی فسیلی از سوی دیگر دولت‌های مختلف را بر آن داشته تا به دنبال جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی باشند. یکی از این جایگزین‌ها بدون شک انرژی باد است. هر چند نیروگاه‌های هسته‌ای در سال‌های اخیر به عنوان یکی از تولیدکنندگان مهم توان الکتریکی مطرح شده‌اند، اما هزینه‌ی بالای احداث و دفن زباله‌ی آن‌ها، آلودگی زیست‌محیطی ناشی از پسماندهای هسته‌ای و به ویژه ترس از سوانح هسته‌ای و پیامدهای مخرب آن (مانند آن‌چه به صورت محدود در فوکوشیما و یا در چرنوبیل اتفاق افتاد) موجب تردد شدن دولت‌ها در استفاده از این منابع شده است. تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد از گزینه‌های دیگر تامین نیاز روزافزون انرژی است که دارای مزایای زیر است:

- توربین‌های بادی برخلاف نیروگاه‌های حرارتی آلاینده‌هایی مثل اکسیدهای سولفور و نیتروژن، جیوه، ذرات معلق و دی اکسیدکربن منتشر نمی‌کنند.
- توربین‌های بادی نیاز به استخراج زغال سنگ، تامین اورانیوم، حفاری‌های مربوط به سوخت‌های فسیلی ندارند و ساخت و تعمیر سدهای آبی را کاهش می‌دهند.
- ساخت مزارع بادی به توسعه‌ی روستایی از طریق اجاره‌ی زمین‌های روستایی از صاحبان آن‌ها کمک می‌نماید. در این صورت منبع درآمد اضافی برای این روستائیان فراهم خواهد شد.
- طرفداران توربین‌های بادی معتقدند این واحدها در مقایسه با سایر روش‌های تولید توان در ساخت، احداث، خدمات جانبی و... بیش‌تر به ایجاد اشتغال کمک می‌کنند.
- زمان ساخت این واحدها نسبت به واحدهای سنتی کم‌تر است.
- این منبع نامحدود بوده و می‌توانند نیاز بشر به انرژی را برای همیشه رفع سازند.
- برای بهره‌برداری به آب نیاز ندارند.

4-1-2 معایب استفاده از توان بادی [7]

برخی معایب تولید انرژی الکتریکی از انرژی بادی به شرح زیر می‌باشد:

- توان تولیدی توسط نیروگاه بادی قابل پیش‌بینی به شکل دقیق نیست.

- نمی‌توان خروجی واحد بادی را به منظور کاهش یا افزایش تولید به میزان مطلوب کنترل کرد.
- بیشینه‌ی توان تولیدی این واحدها همزمان با پیک مصرف نیست.
- برای ایجاد مزارع بادی جدید در اغلب موارد زیرساخت‌های انتقال جدید مورد نیاز است.
- در اکثر نقاط جهان، اداره‌ی این واحدها نیاز به کمک‌های دولتی داشته و هزینه‌بر است.
- برخی از حامیان حقوق حیوانات معتقدند که این واحدها موجب مرگ‌ومیر پرندگان در اثر برخورد با پره‌های توربین می‌شوند؛ هر چند احتمال این برخوردها کم است.
- در مواردی این توربین‌ها با کار رادارها اختلال ایجاد کرده‌اند.
- ساخت این توربین‌ها با ظرفیت بالا ممکن است به دلیل تاثیر بر سرعت باد، عوارض زیست‌محیطی به بار آورد.

5-1-2) حضور نیروگاه‌های بادی در بازار برق

تجدید ساختار صنعت برق، نقطه‌ی عطفی در تاریخ این صنعت بود. با واگذاری واحدهای تولید توان به بخش خصوصی، امکان رقابت این شرکت‌ها به عنوان بازیگران بازار فراهم شد. در چنین بازاری هر شرکت کننده سعی می‌کند توان تولید شده خود را بسته به نوع بازار، به بیشترین میزان و یا قیمت ممکن بفروش برساند. در ابتدا، تجدید ساختار چالشی بزرگ پیش روی دولت‌ها که صاحبان نیروگاه‌های بادی بودند، قرار داد. این مشکل هزینه بالای تولید توان الکتریکی برای این واحدها بود که امکان رقابت این واحدها با سایرهای واحدهای شبکه را غیر ممکن ساخته بود. اما مزایای تولید توان از نیروگاه‌های بادی، دولت‌ها را برآن داشت تا به هر شکل ممکن، طی برنامه‌های بلند مدت، عرصه را برای افزایش گرایش سرمایه‌گذاران به سمت تولید توان بادی افزایش دهند. ابتدا، دولت‌ها تصمیم گرفتند خود اداره‌ی این واحدها را به عهده گرفته و این واحدها خارج از بازار و تمام توان تولیدی خود را بصورت مستقیم به شبکه تحویل دهند. به مرور زمان، برخی از این واحدها کم کم تحت شرایط خاصی (که باز هم حاکی از حمایت کامل دولت‌ها بود) به بخش‌های خصوصی واگذار شد. در این شرایط، واحدها همواره می‌توانستند تمام توان تولیدی خود را به شبکه تزریق کنند و بر اساس میزان تولیدی، قیمتی مانند قیمت حدی گرهی⁶ به علاوه مبلغی حمایتی را از دولت دریافت می‌کردند. این روش تا به امروز نیز در بسیاری از کشورها اجرا می‌شود. به مرور زمان، با پیشرفت تکنولوژی هزینه‌ی تولید این واحدها کاهش یافته است. به گونه‌ای که در مواردی، نیروگاه‌های بادی توانایی تبدیل شدن به بازیگران بازار را پیدا کرده‌اند. از طرفی حمایت‌های دولتی نیز در حال کاهش هستند. به عنوان، مثال در کالیفرنیا مبلغ حمایتی نیروگاه‌های بادی حذف شد و از سال 1999 این واحدها تنها قیمت حدی گرهی را دریافت می‌کنند. این مسائل کم کم نیروگاه‌های بادی را برآن داشت تا خود به عنوان بازیگر بازار وارد میدان شوند تا از این طریق بتوانند درآمد بیشتری را کسب کنند. این کار چند

⁶ - locational marginal price (LMP)

سالیست در اروپا و ایالات متحده آغاز شده است و دولت‌ها نیز مشغول ایجاد شرایط مناسب برای حضور این واحدها در بازار هستند. اما شرکت این واحدها با ظرفیت بالا در شبکه، به مرور زمان مشکلاتی برای بهره‌بردار سیستم ایجاد کرد. تاکنون تحقیقات زیادی در جهت کاهش مشکلات حضور نیروگاه‌های بادی در شبکه‌ی قدرت انجام شده است. موضوع این پایان‌نامه نیز در راستای همین مطالعات می‌باشد.

2-1-6) هزینه‌ی عدم تعادل

ساختار کلی بازارهای برق عموماً دارای یک بازار روزانه است که شرکت‌کنندگان در این بازار قیمت و ظرفیت خود را برای ساعات مختلف روز بعد ارائه می‌دهند. فاصله‌ی زمانی بین بسته شدن این بازار تا شروع زمان تحویل توان در بازارهای مختلف متفاوت است. مثلاً در بازار بلژیک، بازار روزانه ساعت 14 بعد از ظهر بسته می‌شود و شرکت‌ها بایستی پیشنهاد تولید خود را برای 10 تا 34 ساعت آینده ارائه دهند. بهره‌بردار سیستم نیز با در نظر گرفتن قیود فنی شبکه نظیر تعادل بین تولید و مصرف، توان هر یک از واحدها را به گونه‌ای تعیین می‌کند که رفاه اجتماعی حداکثر گردد. در زمان اجرای بازار ممکن است به دلیلی یکی از تولیدکننده‌ها نتواند دقیقاً مقدار توان پذیرفته شده‌ی خود را تولید کند که در این صورت با کاهش یا افزایش تولیدی بیش از مقدار برنامه‌ریزی شده روبرو می‌شویم. در این شرایط برابری بین تولید و مصرف به هم می‌خورد. در صورتی که این شرایط در زمان کوتاهی رخ دهد و یا میزان آن کم باشد تاثیر قابل توجهی بر شبکه نخواهد داشت و اثر آن با توجه به انرژی ذخیره شده در اجسام گردان شبکه جبران می‌شود. در غیر این صورت شبکه با مشکل نابرابری عرضه و تقاضا روبرو می‌گردد که این حالت را عدم تعادل⁷ در شبکه می‌نامند. نیروگاه‌های دارای عدم قطعیت بالا، نقش عمده‌ای در ایجاد عدم تعادل تولید ایفا می‌کنند. مهم‌ترین این دسته از نیروگاه‌ها نیروگاه‌های بادی هستند. همانطور که قبلاً اشاره شد، تولید نیروگاه بادی قابلیت پیش‌بینی دقیق را دارا نمی‌باشد. از طرف دیگر کنترل توان خروجی این نیروگاه‌ها نیز به راحتی امکان‌پذیر نیست. لذا در صورت استفاده از توان بادی از حجم بالا، میزان عدم تعادل در زمان بهره‌برداری از بازار افزایش می‌یابد. در کشورهای دارای ظرفیت‌های بالای تولید توان بادی، عدم تعادل همواره به عنوان مشکلی اساسی مطرح است و محققان و بهره‌برداران همواره تلاش می‌کنند راهکارهایی بهینه برای کاهش عدم تعادل در شبکه بیابند. به این نکته هم باید توجه کرد که عدم تعادل در پاره‌ای از موارد از سمت مصرف‌کننده ناشی می‌شود. بحث ما در این جا بیش‌تر معطوف به بخش تولیدکننده‌ی توان و نیروگاه‌های بادی است. در حالت کلی دو نوع عدم تعادل تعریف می‌شود:

1. عدم تعادل مثبت: که در آن مقدار توان تولید شده توسط نیروگاه، از مقدار پیش‌بینی شده‌ی پذیرفته شده در بازار بیش‌تر است.
2. عدم تعادل منفی: که در آن مقدار توان تولید شده از مقدار پیش‌بینی شده کم‌تر است.

⁷- imbalance

عدم تعادل موجب بروز ناپایداری در سیستم قدرت می‌شود و ادامه‌ی این شرایط می‌تواند به قطع بار و یا ورود سیستم به وضعیت اضطراری بینجامد. بهره‌بردار سیستم مسئول اصلی حفظ سیستم قدرت در وضعیت پایدار است. در صورت عدم برقراری تعادل بین تولید و مصرف، هزینه‌هایی متوجه بهره‌بردار می‌شود. از یک طرف ممکن است بار مصرف‌کننده‌ای تامین نشود که در این صورت موظف به پرداخت جریمه خواهد شد و از طرف دیگر مشکلاتی برای سیستم و سایر تولید کنندگان پیش خواهد آمد. از این رو بهره‌بردار سیستم موظف به انجام اقداماتی جهت غلبه بر این وضعیت است. در حالت معمول رزورهای تحت عنوان رزرو تنظیم‌کننده⁸ می‌توان برای جبران این عدم تعادل در نظر گرفته می‌شود. تامین این رزرو نیز هزینه‌هایی برای بهره‌بردار به دنبال دارد. در بازارهای مختلف از روش‌های متفاوتی برای تامین این هزینه‌ها استفاده می‌شود. در برخی نقاط این رزورها جزو خدمات جانبی⁹ در نظر گرفته می‌شود و هزینه‌ی آن از مصرف‌کنندگان شبکه دریافت می‌شود. در روش‌هایی که اخیراً مورد استفاده قرار می‌گیرد، هر شرکت‌کننده‌ی بازار مسئول عدم تعادلی است که در بازار ایجاد کرده و با توجه به سهمی که در عدم تعادل دارد، هزینه‌ی عدم تعادل پرداخت می‌کند.

قیمت‌گذاری این سرویس به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. دو روش اصلی عبارتند از [8]:

1. قیمت‌گذاری منفرد: در این روش یک قیمت یکسان برای عدم تعادل‌های مثبت و منفی در نظر می‌گیرند.
2. قیمت‌گذاری دوگان: در این روش دو قیمت متفاوت برای عدم تعادل‌های مثبت و منفی در نظر گرفته می‌شود.

روش قیمت‌گذاری دوگان، مرسوم‌ترین روش استفاده شده در کشورهای مختلف است. در ادامه، توضیحات بیشتری در مورد این روش قیمت‌گذاری ارائه می‌شود. نمونه‌ای از این روش تسویه حساب، برای نیروگاه‌های Off-shore بازار بلژیک در جدول 1-2 آورده شده است [8]. اول این که به منظور حمایت بیشتر از نیروگاه‌های بادی، محدوده‌ای تحت عنوان حد تحمل¹⁰ برای خطای پیش‌بینی در نظر گرفته می‌شود. این حد در کشور بلژیک برای نیروگاه‌های Off-shore برابر 30 درصد و برای نیروگاه‌های On-shore برابر 10 درصد است. این درصدها با توجه به نوسانات بیشتر خروجی توربین‌های Off-shore و بالاتر بودن خطای پیش‌بینی این واحدها نسبت به واحدهای On-shore انتخاب شده است. در صورتی که خطای عدم تعادل درون این محدوده باشد مبلغ جریمه نسبت به حالتی که خارج از این محدوده باشد، کم‌تر است. در صورتی که عدم تعادل مثبت باشد، بهره‌بردار انرژی مازاد را با قیمتی کم‌تر از قیمت بازار از مسئول عدم تعادل خریداری می‌کند و برعکس، در صورتی که عدم تعادل منفی باشد، نیروگاه ملزم به خرید کمبود انرژی خود، با قیمتی بیش از قیمت بازار است. این پول از یک طرف صرف تامین انرژی لازم شبکه با استفاده از رزورهای تنظیم‌کننده می‌شود که معمولاً گران‌تر از واحدهای دیگر

⁸- regulation reserve

⁹- ancillary service

¹⁰- tolerance margin

هستند و از طرف دیگر، انگیزه‌ای برای ارائه‌ی روش‌های پیش‌بینی دقیق‌تر تولید توربین‌های بادی توسط مالکان آنها می‌باشند.

جدول 2-1- قیمت‌گذاری عدم تعادل در بلژیک برای نیروگاه‌های off-shore

	کم‌تر از 30 %	بیش‌تر از 30 %	
		عدم تعادل سیستم مثبت باشد	عدم تعادل سیستم منفی باشد
عدم تعادل مثبت	بهره‌بردار انرژی تولید شده اضافی را با 0/9 قیمت بازار از مسئول عدم تعادل خریداری می‌کند.	بهره‌بردار انرژی تولید شده اضافی را با قیمتی کم‌تر از 0/9 قیمت بازار از مسئول عدم تعادل خریداری می‌کند.	بهره‌بردار انرژی تولید شده اضافی را با 0/92 قیمت بازار از مسئول عدم تعادل خریداری می‌کند.
عدم تعادل منفی	مسئول عدم تعادل باید کمبود انرژی تولیدی خود را با 1/1 قیمت بازار خریداری کند.	مسئول عدم تعادل باید کمبود انرژی تولیدی خود را با 1/08 قیمت بازار خریداری کند.	مسئول عدم تعادل باید کمبود انرژی تولیدی خود را با قیمتی بیش‌تر از 1/08 قیمت بازار خریداری کند.

در صورتی که میزان خطا از حد تحمل بیش‌تر باشد، هزینه‌ی عدم تعادل به هم‌جهت بودن یا مختلف‌الجهت بودن عدم تعادل با عدم تعادل سیستم بستگی دارد. در صورتی که عدم تعادل واحد یا شرکت مورد نظر در کاهش عدم تعادل کل سیستم موثر باشد، مقدار جریمه کاهش می‌یابد و در حالت عکس افزایش می‌یابد. روش کلی تسویه حساب در بسیاری از کشورهای دیگر نیز مشابه روند فوق است و تنها در جزئیات مربوط به تعیین ضرایب تفاوت‌هایی وجود دارد. مثلاً در بازار برق دانمارک حد تحمل تعریف نشده و برای هر میزان خطا یک روند واحد وجود دارد. در بازار کالیفرنیا [9]، جهت تشویق تولیدکنندگان انرژی بادی به کاهش خطای پیش‌بینی خود به زیر حد تحمل، میزان جریمه‌ی تعیین شده برای عدم تعادل‌های مثبت و منفی بیش از حد تحمل، به ترتیب برابر با 50 و 100 درصد قیمت بازار است. همچنین جریمه‌ها برای خطای پیش‌بینی کم‌تر از 3 درصد بخشیده می‌شود. در برخی کشورها نیز هزینه عدم تعادل به میزان بار و خطای عدم تعادل بستگی دارد. نمونه‌ای از این قیمت‌گذاری در جدول 2-2 نشان داده شده است [10]. در قیمت‌گذاری این جدول، قیمت عدم تعادل برای مقادیر مختلف بار سیستم متفاوت است. هر چه بار سیستم بیش‌تر باشد، میزان جریمه‌ها نیز بیش‌تر خواهد بود. در هر سطح از بار نیز درصدهای خطای عدم تعادل متفاوت توان بادی، با قیمت‌های متفاوتی جریمه می‌شوند. هر چه خطای عدم تعادل کم‌تر باشد، میزان جریمه نیز کم‌تر است. مشابه روش‌های قبلی هزینه‌ی عدم تعادل در این روش نیز برای عدم تعادل‌های منفی (انحراف مثبت) بیشتر است. در این روش، قیمت عدم تعادل به صورتی ضربی از قیمت در بازار روزانه تعیین می‌شود.