

## بهینه توان ذخیره شبکه برق در شرایط بحرانی جهت آمادگی در برابر تهدیدات

محمدحسین رنجبار<sup>۱</sup>، ابوالفضل پیرایش<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت: ۹۴/۰۶/۲۳، پذیرش: ۹۴/۱۱/۱۳)

### چکیده

تأمین امنیت انرژی در شرایط بحرانی از جمله حیاتی‌ترین مباحث پدافند غیرعامل است. در شرایط بحرانی ممکن است شبکه برق در اثر وقوع حمله، با کمبود توان مواجه شود. یکی از راه‌های مقابله با کمبود توان در این شرایط تزریق توان ذخیره می‌باشد. میزان توان ذخیره آماده شبکه می‌بایست با توجه به شرایط موجود، به صورت بهینه تعیین گردد. در این تحقیق روشی نوین برای تعیین انرژی تأمین نشده شبکه بر اساس پخش بار بهینه ارائه شده است. سپس با استفاده از تحلیل هزینه-منفعت، میزان توان ذخیره به صورت بهینه تعیین شده است. در شرایط بحرانی در تحلیل هزینه-منفعت، ارزش بار ازدست‌رفته و دسترس‌ناپذیری اجزاء شبکه به شدت افزایش می‌یابد و طبیعتاً میزان بهینه توان ذخیره نسبت به شرایط عادی افزایش می‌یابد. روش ارائه‌شده بر روی شبکه ۲۴ باسه IEEE اجرا شده است و کارایی آن نشان داده شده است.

**کلید واژه‌ها:** توان ذخیره، دسترس‌ناپذیری، ارزش بار ازدست‌رفته، انرژی تأمین‌نشده، روش مونت کارلو

## Optimal Reserve Allocation of Power System in Critical Situation For Preparation against Threats

M. H. Ranjbar, A. Pirayesh\*

Shahid Beheshti University

(Received: 14/09/2015; Accepted: 02/02/2016)

### Abstract

Providing energy security in critical situation is one the most important issue in passive defence. Power system could face lack of power supply caused by attack in critical situation. Injecting reserve power is a good tool to confront lack of power in this condition. Reserve power must be allocated optimally based on current situation. This paper presents a new method for calculating system's Energy not supplied based on optimal power flow. Then reserve power is allocated optimally by cost/benefit analysis. In critical situation, value of lost load and unavailability of components are increased and consequently the optimized value of reserve power is increased rather than normal situation. The presented method is tested on IEEE 24-bus test system and results have shown the efficiency of this method.

**Keywords:** Reserve Power, Unavailability, Value of Lost Load, Energy Not Supplied, Monte Carlo

\* Corresponding Author E-mail: A\_pirayesh@sbu.ac.ir

## ۱. مقدمه

زندگی در جوامع مدرن و توسعه‌یافته امروزی متأثر از زیربناهای اساسی آن جوامع است به نحوی که کارکرد پیوسته و بدون اختلال این زیربناهای بر کیفیت زندگی انسان‌ها، رفاه عمومی و ثروت عمومی اثر بسیار زیادی می‌گذارد. مسئله امنیت و قابلیت اطمینان زیربناهای اساسی در برابر حوادث طبیعی و غیرطبیعی و همچنین مسئله بهبود و توسعه زیرساخت‌های اساسی موجود توجهات زیادی را در طول سال‌های اخیر به خود جذب کرده است [۶-۱]. زیرساخت شبکه برق یکی از مهم‌ترین و شاید اساسی‌ترین زیرساخت‌های هر کشور است [۷].

در سال‌های اخیر بحث امنیت سامانه قدرت و مقابله با تهدیدات امنیتی مطرح شده است و تجربیات جنگ‌ها و درگیری‌های این سال‌ها بر اهمیت این موضوع افزوده است. جنگ‌های بالکان و عراق نمونه‌هایی از حملات مستقیم به زیرساخت سامانه قدرت است [۸].

همچنین، اخیراً نگرانی از وجود گروه‌های تروریستی که خطر بزرگی برای کشورهای جهان محسوب می‌شوند و تهدیدات بالقوه آن‌ها بر سامانه قدرت افزایش یافته است [۹-۱۱].

برای داشتن شبکه برقی ایمن و مطمئن باید دائماً بین تولید توان و مصرف آن تعادل وجود داشته باشد. در صورت عدم وجود تعادل بین تولید و مصرف، فرکانس سامانه و ولتاژ نقاط مختلف آن دچار تغییر شده و از محدوده مجاز خارج می‌شوند. هدف از حمله مستقیم به تأسیسات سامانه قدرت، اختلال در عملکرد سامانه به نحوی است که سامانه با کمبود توان مواجه شده و مشترکان شبکه با قطعی برق مواجه شوند [۱۲]. یکی از راه‌کارهای مقابله با کمبود توان، تزریق توان ذخیره است که حین وقوع حادثه در شبکه با آزاد شدن ظرفیت استفاده‌نشده واحدهای تولیدی انجام می‌پذیرد.

در شرایط عادی، توان ذخیره به صورت خدمات جانبی<sup>۱</sup> از سوی شرکت‌ها فروخته می‌شود و باید به صورت اقتصادی بهینه تعیین شود. در شرایط بحرانی، توان ذخیره به عنوان یکی از اقدامات مدیریت بحران از سوی بهره‌بردار به کار گرفته می‌شود و باید علاوه بر برآوردن الزامات امنیت، به صورت اقتصادی و بهینه تعیین شود [۱۳]. چه بسا در مواردی تهدید علیه کشوری برای مدت طولانی باقی بماند و در طول این مدت باید مسائل اقتصادی و بهره‌وری فراموش نشود.

توان ذخیره به دو نوع توان ذخیره چرخان و توان ذخیره غیرچرخان تقسیم می‌شود. توان ذخیره چرخان به واحدهایی گفته می‌شود که به شبکه متصل هستند و به سرعت می‌توانند تزریق توان انجام دهند. واحدهای غیرچرخان واحدهایی هستند

که می‌توانند سریع روشن شوند و در عرض چند ده دقیقه به تزریق توان در شبکه بپردازند. در این تحقیق توان واحدهای ذخیره چرخان به صورت بهینه تعیین می‌شود.

در گذشته میزان توان ذخیره به صورت قطعی<sup>۲</sup> مشخص می‌شد. به عنوان مثال، توان ذخیره را به اندازه ۱۰ درصد کل بار سامانه و یا به اندازه بزرگ‌ترین واحد تولید توان در نظر گرفته می‌شد. اگرچه در نظر گرفتن توان ذخیره به اندازه بزرگ‌ترین واحد تولیدی بسیار راحت است و محاسباتی در پی ندارد ولی این مقدار توان ذخیره با توجه به شرایط سامانه می‌تواند بسیار غیربهینه و نادرست باشد [۱۴]. از همین رو، روش‌هایی برای تعیین توان ذخیره مطرح شد که ماهیت احتمالی خروج تجهیزات سامانه و مسائل قابلیت اطمینان را در نظر می‌گرفت.

به عنوان مثال، چاتوپاداوی و همکاران [۱۵]، میزان توان ذخیره را در حل مسئله در مدار قرارگیری واحدها<sup>۳</sup> که قید قابلیت اطمینان به سایر قیود اضافه شده است، تعیین می‌کنند. آن‌ها از شاخص قابلیت اطمینان احتمال از دست رفتن بار<sup>۴</sup> به عنوان قید استفاده کرده‌اند. در ادامه بوفارد و همکاران [۱۶] از شاخص قابلیت اطمینان بار تأمین‌نشده<sup>۵</sup> در تعیین میزان بهینه توان ذخیره استفاده کرده است. تعیین دلخواه و غیربهینه میزان سطح قابل قبول احتمال بار از دست رفته و بار تأمین‌نشده از جمله معایب این روش‌ها است.

برای غلبه بر این عیوب، ونگ و همکاران [۱۷] مسئله تعیین توان ذخیره را به صورت یک مسئله هزینه-منفعت بیان کرده‌اند. مرجع [۱۸] مدلی تقریبی برای محاسبه انرژی تأمین‌نشده شبکه به صورت تابع تکه‌خطی ارائه کرده است. روش‌های دیگری نیز برای تعیین میزان توان ذخیره شبکه با استفاده از تحلیل هزینه-منفعت مطرح شده‌اند که آن‌ها نیز معایبی نظیر عدم در نظر گرفتن مدل کامل شبکه در تعیین انرژی تأمین‌نشده، ثابت گرفتن نرخ هزینه بار از دست رفته برای تمامی مشترکین شبکه و ... دارند [۱۹-۲۱].

در این تحقیق روشی نوین برای تعیین انرژی تأمین‌نشده شبکه به صورت دقیق و با در نظر گرفتن احتمال از دست رفتن تمامی اجزاء و همچنین، توپولوژی کامل شبکه و تمامی قیود بهره‌بردار، بر اساس روش مونت کارلو ارائه می‌شود. سپس با استفاده از تحلیل هزینه-منفعت میزان توان ذخیره به گونه‌ای بهینه تعیین می‌شود که منفعت ناشی از خرید این میزان توان ذخیره با هزینه ناشی از نخریدن میزان بیش‌تر توان ذخیره برابری کند.

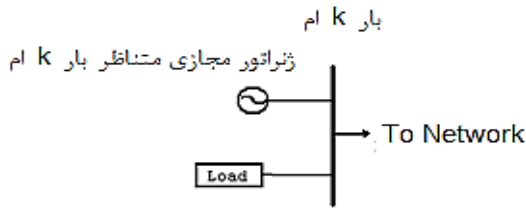
<sup>2</sup> Deterministic

<sup>3</sup> Unit Commitment

<sup>4</sup> Loss of Load Probability

<sup>5</sup> Load Not Supplied

<sup>1</sup> Ancillary Services



شکل ۲. مدل کردن ژنراتور مجازی بار k ام

زمانی که برنامه پخش بار بهینه اجرا می‌شود، از آنجایی که برنامه میزان توان خروجی واحدها را بر اساس هزینه و قیود بهره‌برداری تعیین می‌کند، ژنراتورهای اصلی و ذخیره بار را تأمین می‌کنند و ژنراتورهای مجازی چون هزینه بسیار بالایی در اولویت تولید توان قرار نمی‌گیرند. حال فرض کنید که بر اثر وقوع یک اتفاق بسیار شدید، مجموع توان خروجی واحدهای تولید و ذخیره قادر به تأمین بار نیست و یا شرایط شبکه به گونه‌ای در آمده که برخی از قیود نقض می‌شود. در این صورت به‌ناچار ژنراتور مجازی برای تولید توان در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که ژنراتورهای مجازی ژنراتورهای فرضی هستند، میزان توانی که این ژنراتورها تولید می‌کنند نشان‌دهنده میزان کمبود توان در شبکه است. بنابراین مجموع توان تولیدشده توسط ژنراتورهای مجازی برابر مجموع بار تأمین‌نشده است که حاصل ضرب آن در زمان قطعی برابر انرژی تأمین‌نشده می‌باشد [۲۲].

در بدترین شرایط اگر فرض شود تمامی خطوط و یا تمامی واحدهای نیروگاهی قطع شود، تمامی ژنراتورهای مجازی برای تأمین بار متصل به باس متناظر خود به‌اندازه بار متناظر به تولید توان می‌پردازند و در این حالت بار تأمین‌نشده برابر کل بار سامانه است. اگر شبکه به‌اندازه کافی توان ذخیره داشته باشد هنگام وقوع حوادث، توان ذخیره کمبود توان را جبران کرده و نیاز به تزریق توان توسط ژنراتورهای مجازی (در حقیقت قطع بار باس متناظر) نیست. پخش بار بهینه می‌تواند پخش بار بهینه DC و یا پخش بار بهینه AC باشد. در این مقاله از پخش بار بهینه AC استفاده شده است.

مدل‌سازی حادثه به این صورت انجام می‌شود که برای هر یک از عناصر شبکه مانند پست، نیروگاه و خطوط انتقال عدد رندمی بین صفر و یک تولید می‌شود. اگر این عدد رندم کوچک‌تر از نرخ خروج اجباری عنصر مورد نظر باشد، آن عنصر بر اثر حادثه از شبکه خارج می‌شود و وضعیت آن عنصر در برنامه برابر صفر قرار می‌گیرد. اگر عدد رندم بزرگ‌تر از نرخ خروج اجباری شود آن

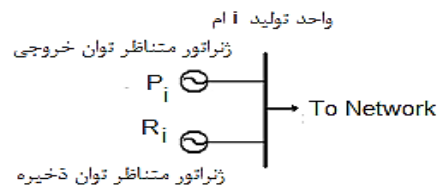
در فصل دوم، انرژی تأمین‌نشده شبکه بر اساس روش مونت کارلو محاسبه می‌شود. در فصل سوم، روش تعیین میزان بهینه توان ذخیره بر اساس تحلیل هزینه-منفعت ارائه شده است. در فصل چهارم، شبیه‌سازی اعمال و نتایج آورده شده است. در فصل آخر نیز نتیجه‌گیری بیان شده است.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. محاسبه انرژی تأمین‌نشده<sup>۱</sup>

انرژی تأمین‌نشده به معنای میزان توان (انرژی) است که در صورت وقوع حادثه‌ای مشخص، قطع می‌شود. در محاسبه انرژی تأمین‌نشده باید تمامی شرایط شبکه مشخص باشد. در گذشته انرژی تأمین‌نشده بر اساس جدول احتمال ازدست‌رفتن ظرفیت<sup>۲</sup> محاسبه می‌شد که تنها ازدست‌رفتن واحدهای نیروگاهی را در نظر می‌گیرد. این جدول احتمال ازدست‌رفتن دیگر اجزاء (بر اساس حوادث طبیعی و یا حمله به شبکه) نظیر خطوط انتقال را در تعیین میزان انرژی تأمین‌نشده نظر نمی‌گیرد. همچنین توپولوژی شبکه و قیود بهره‌برداری نیز در این روش در نظر گرفته نمی‌شود.

در روش ارائه‌شده در این مقاله، انرژی تأمین‌نشده توسط پخش بار بهینه (البته با تغییراتی) محاسبه می‌شود [۲۲]. فرض کنید که شبکه ما مشخص است و توان خروجی و توان ذخیره هر کدام از واحدها مشخص است. هر واحد برای توان خروجی و همچنین توان ذخیره خود نرخ را پیشنهاد می‌دهد. این نرخ برابر هزینه حدی تولید توان خروجی یا ذخیره نگه‌داشتن ظرفیت واحد است. در اینجا پخش بار بهینه به این صورت تغییر می‌یابد که به تمامی باس‌های تولید یک ژنراتور اضافه می‌شود که در شکل (۱) نشان داده شده است. این ژنراتور بیانگر توان ذخیره آن واحد تولید است و مانند ژنراتوری که برای تأمین توان خروجی در نظر گرفته می‌شود، ظرفیت بیشینه و هزینه مشخصی دارد که به بهره‌بردار شبکه پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱. مدل کردن توان خروجی و توان ذخیره واحد تولید i ام

همچنین به تمامی باس‌های مصرف یک ژنراتور مجازی (فرضی) اختصاص می‌دهیم که در شکل (۲) نشان داده شده است. به این ژنراتور مجازی ظرفیت بیشینه‌ای هم‌مقدار با بار مصرفی آن باس و هزینه‌ای فوق‌العاده زیاد فرضی در نظر گرفته می‌شود.

<sup>3</sup> Status

<sup>1</sup> Expected Energy Not Supplied (EENS)

<sup>2</sup> Capacity Outage Probability Table

با:

$$EENS_{Cost} = EENS \times VOLL \quad (۰)$$

به این هزینه، هزینه تحمیلی انرژی تأمین‌نشده می‌گوییم. در واقع، با قطع برق مشترکان این هزینه را متحمل می‌شوند و این هزینه با کاهش رفاه عمومی آن‌ها و با نارضایتی اجتماعی آن‌ها خود را نشان می‌دهد. هرچه توان ذخیره بیشتر باشد، هزینه بهره‌برداری بیشتر می‌شود اما از سوی دیگر میزان انرژی تأمین‌نشده کم‌تر می‌شود و هزینه‌ای که مصرف‌کنندگان متحمل می‌شوند و در واقع از دست می‌دهند نیز کم‌تر می‌شود.

اگر توان ذخیره زیاد باشد، هزینه‌ای که مصرف‌کنندگان کاهش رفاه عمومی خود از دست می‌دهند کم‌تر می‌شود و اگر توان ذخیره کم باشد هزینه بهره‌برداری که بر مصرف‌کنندگان تحمیل می‌شود کم‌تر می‌شود که باید بین این دو مصالحه صورت گیرد. این همان تحلیل هزینه-منفعت است. بنابراین توان ذخیره بهینه باید به نحوی تعیین شود که مجموع دو هزینه بهره‌برداری و هزینه تحمیلی انرژی تأمین‌نشده کمینه باشد. این مسئله به صورت زیر قابل بیان است.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I c_i^t \times p_i^t + s_i \times k_i^t + q_i^t \times r_i^t + EENS^t \times VOLL^t \quad (۲)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^I p_i^t = p_d^t \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (۳)$$

$$p_i^{t, \min} \leq p_i^t \leq p_i^{t, \max} \quad \forall i = 1, 2, \dots, I, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (۴)$$

$$r_i^t \leq \tau \times Ramp_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, I, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (۵)$$

$$r_i^t + p_i^t \leq p_i^{t, \max} \quad \forall i = 1, 2, \dots, I, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (۶)$$

در این روابط داریم:

$i, t$  به ترتیب بیانگر بازه بهره‌برداری و واحد تولید است.

$p_i^t, r_i^t$  توان خروجی و توان ذخیره واحد  $i$  در بازه  $t$  است.

$s_i$  هزینه راه‌اندازی واحد  $i$  است.

$q_i^t, c_i^t$  به ترتیب نرخ پیشنهادی برای توان ذخیره و توان خروجی واحد  $i$  در بازه  $t$  است.

$u_i^t$  بیانگر وضعیت واحد  $i$  در بازه  $t$  است (۰ یا ۱).

$k_i^t$  متغیر باینری است که برابر با زیر تعریف می‌شود:

عنصر در شبکه باقی می‌ماند. انرژی تأمین‌نشده در صورت باقی‌ماندن یا خارج شدن آن عنصر محاسبه می‌شود. به طور مثال فرض کنید نرخ خروج اجباری خط انتقال  $i$  ام برابر  $0/05$  باشد، در این صورت داریم:

$$\text{If } \text{rand}(0,1) < 0/05 \quad \text{Status}=0$$

$$\text{Else} \quad \text{Status}=1$$

از آنجایی که تولید اعداد رندم کاملاً تصادفی است و با تعداد معهود آزمایش نمی‌توان انرژی تأمین‌نشده را به صورت دقیق محاسبه کرد، با استفاده از روش مونت کارلو تعداد دفعات تکرار تا هزاران تکرار انجام می‌شود و میانگین خروجی به دست آمده به عنوان خروجی قابل قبول پذیرفته می‌شود.

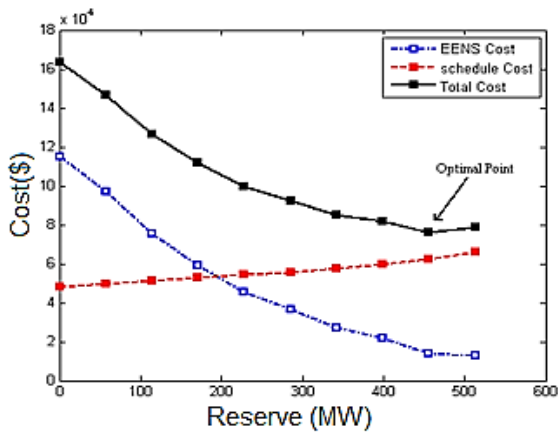
مدل‌سازی حادثه در مواقع اضطرار و تهدید متفاوت است. در این حالت نرخ خروج اجباری عناصر برابر نرخ خروج اجباری آن‌ها در شرایط غیرتهدید نیست. نرخ خروج اجباری واحدها باید باتوجه به موقعیت جغرافیایی عناصر، نزدیکی و دوری آن‌ها به مناطق تهدیدزا، میزان آسیب‌پذیری آن‌ها، میزان حفاظت و مستحکم‌سازی آن‌ها و غیره تعیین شود [۱۳].

## ۲-۲. تعیین بهینه توان ذخیره

در روش ارائه شده مقدار بهینه توان ذخیره باتوجه به تحلیل هزینه-منفعت مشخص می‌شود [۲۲]. در نظر گرفتن توان ذخیره هزینه‌ای را برای بهره‌بردار شبکه ایجاد می‌کند. این هزینه شامل هزینه پرداختی به واحدها جهت آماده‌بودن برای تزریق توان ذخیره و همچنین هزینه استفاده از واحدهای کم‌بازده‌تر برای تولید توان خروجی است.

هرچه میزان توان ذخیره بیشتر در نظر گرفته شود واحدهای کم‌بازده‌تر به خصوص در ساعت اوج مصرف برق بیش‌تر وارد مدار می‌شوند و هزینه بهره‌برداری را افزایش می‌دهند. بنابراین با افزایش توان ذخیره شبکه هزینه بهره‌برداری که شامل دو هزینه فوق است و بر مصرف‌کنندگان متحمل می‌شود افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر همان‌طور که در فصل اول بیان شد، مصرف‌کنندگان حاضرند هزینه‌ای را بپردازند تا در یک بازه زمانی مشخص برقشان قطع نشود. به طور مثال، فرض کنید در ساعت مشخصی از شبانه‌روز برنامه‌ای محبوب از تلویزیون در حال پخش است که مصرف‌کنندگان حاضرند میزان مشخصی (که معمولاً بیش‌تر از بهای برق است) را بپردازند ولی این برنامه را بر اثر قطع برق از دست ندهند. هزینه‌ای که مصرف‌کنندگان (خانگی، صنعتی و یا نظامی) حاضرند برای برق‌دار بودن بپردازند برابر است



شکل ۳. منحنی هزینه‌ها برحسب توان ذخیره

در شکل (۳) مشخص است که منحنی هزینه بهره‌برداری با افزایش توان ذخیره افزایش یافته است. در مقابل منحنی هزینه انرژی تأمین‌نشده با افزایش توان ذخیره کاهش یافته است و منحنی هزینه کل که مجموع این دو هزینه است ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است. نقطه‌ای که در منحنی هزینه کل کم‌ترین مقدار را دارد نقطه‌ای است که میزان توان ذخیره در آن بهینه است و برنامه تولید واحدها و توان ذخیره آن‌ها باید با توجه به آن میزان توان ذخیره تعیین شود.

در شرایط بحرانی تحلیل هزینه-منفعت به این‌صورت تغییر می‌کند که ارزش بار ازدست‌رفته افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش دسترس‌ناپذیری اجزاء شبکه، انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه هزینه تحمیلی انرژی تأمین‌نشده خصوصاً برای بارهای نظامی و صنعتی به شدت افزایش می‌یابد و نتیجتاً توان ذخیره بهینه مورد انتظار در آن شرایط افزایش می‌یابد.

دسترس‌ناپذیری اجزاء شبکه در شرایط بحرانی توسط پارامترهای فنی، جغرافیایی، عمومی و غیره تعیین می‌شود. غفارپور و همکاران [۱۳] روشی برای تعیین دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌های شبکه در شرایط بحرانی ارائه داده‌اند. در محاسبه انرژی تأمین‌نشده شبکه (فصل ۲-۱)، دسترس‌ناپذیری در شرایط بحرانی با نرخ خروج اجباری در شرایط عادی جایگزین می‌شود [۱۳]. مطابق شکل (۴) اگر ورودی تحلیل نرخ خروج اجباری واحدها باشد، انرژی تأمین‌نشده در شرایط عادی حاصل می‌شود و اگر ورودی تحلیل دسترس‌ناپذیری اجزاء باشد، انرژی تأمین‌نشده در شرایط بحرانی حاصل می‌شود. شکل (۵) روند نمای روش ارائه‌شده را نشان می‌دهد.

$$(k_i^t \geq 0 \ \& \ k_i^t \geq u_i^t - u_i^{t-1})$$

$p_d^t$  بار کل سامانه در بازه بهره‌برداری  $t$  است.

$Ramp_i$  نرخ رمپ واحد  $i$  است.

$\tau$  زمان لازم برای در مدار قرارگرفتن کل ظرفیت توان ذخیره چرخان است (۱۰ دقیقه).

$p_i^{t,max}, p_i^{t,min}$  حداکثر و حداقل ظرفیت واحد  $i$  در بازه  $t$  است.

$VOLL^t$  ارزش بار ازدست‌رفته در بازه بهره‌برداری  $t$  است.

$EENS^t$  انرژی تأمین‌نشده سامانه در بازه بهره‌برداری  $t$  است.

رابطه (۲) برای یک بازار انرژی شبانه‌روزی<sup>۱</sup> تعریف می‌شود که در آن، بازه بهره‌برداری ۲۴ بازه یک‌ساعته است. در رابطه (۲) سه ترم اول رابطه بیانگر هزینه بهره‌برداری و ترم آخر بیانگر هزینه تحمیلی انرژی تأمین‌نشده است. مجموع این هزینه‌ها کمینه می‌گردد.

برای بازار یک‌ساعته<sup>۲</sup> رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^I [c_i \times p_i + q_i \times r_i] + EENS \times VOLL \right\} \quad (7)$$

قیود رابطه (۷) همان قیود روابط (۳-۶) است. برای شبکه‌های سنتی روابط UC به‌سادگی جایگزین سه ترم اول رابطه (۲) می‌شوند.

در روابط (۲ و ۷) برخی از متغیرها وابسته و برخی مستقل هستند. برای حل این معادلات با فرض دانستن مقدار توان ذخیره، ابتدا هزینه بهره‌برداری کمینه محاسبه می‌شود. این کار بر اساس پخش اقتصادی<sup>۳</sup> انجام می‌شود و در نتیجه برنامه<sup>۴</sup> توان خروجی واحدها و همچنین توان ذخیره آن‌ها به‌دست می‌آید. حال با دانستن برنامه واحدها برای تولید توان خروجی و توان ذخیره به‌نحوی که هزینه بهره‌برداری کمینه گردد، با استفاده از روش ارائه‌شده در فصل ۲ انرژی تأمین‌نشده شبکه محاسبه می‌شود. مجموع هزینه بهره‌برداری و هزینه تحمیلی انرژی تأمین‌نشده برابر هزینه کل می‌باشد. این روند برای مقدار مختلف توان ذخیره مثلاً ۰٪، ۲٪، ۴٪، ... و ۲۰٪ بار سامانه تکرار شده و هزینه کل برای نقاط مختلف محاسبه می‌شود. می‌توان نقاط به‌دست‌آمده را درون‌یابی کرد و یک منحنی برای هزینه‌ها برحسب توان ذخیره به‌دست آورد. این منحنی‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Day-Ahead Market

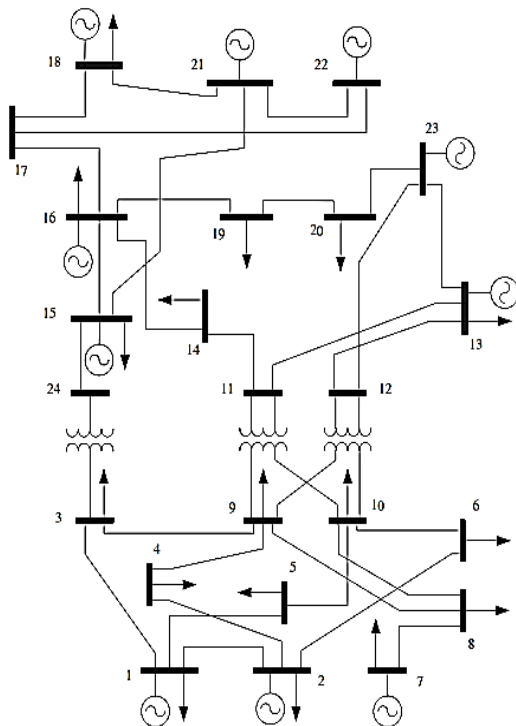
<sup>۲</sup> Hour-Ahead Market

<sup>۳</sup> Economic Dispatch

<sup>۴</sup> Schedule

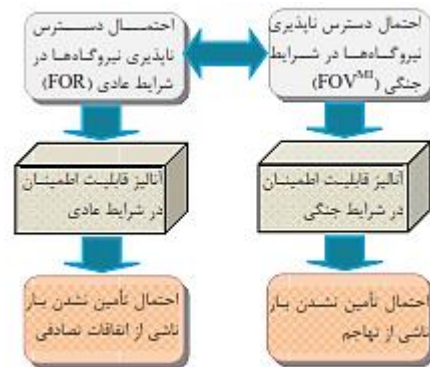
### ۳. نتایج و بحث

کاربرد روش ارائه‌شده در مقاله بر روی شبکه ۲۴ باسه تست IEEE آزمایش شده است [۲۳]. این شبکه در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شبکه در کنار سایر واحدهای تولید، ۶ واحد تولید آبی و یک کندانسور سنکرون بر کنترل توان راکتیو وجود دارد. ۶ واحد تولید آبی تنها به تولید توان می‌پردازند و هیچ توان ذخیره‌ای ارائه نمی‌کنند. فرض می‌شود تزریق توان توسط این واحدهای تولید آبی و نیز تزریق توان راکتیو توسط کندانسور سنکرون هزینه‌ای ندارد و درواقع این واحدها در مالکیت بهره‌بردار سامانه است. این شبکه تست شامل ۳۸ خط انتقال است. هزینه تولید توان سایر واحدها برابر هزینه حدی آن‌ها در توان بیشینه در نظر گرفته می‌شود. این هزینه توسط مالکین واحدهای تولیدی به بهره‌بردار پیشنهاد می‌شود. هزینه آماده‌باش برای تزریق هر مگاوات توان ذخیره واحدها نصف هزینه تولید توان هر مگاوات آن‌ها فرض شده است.

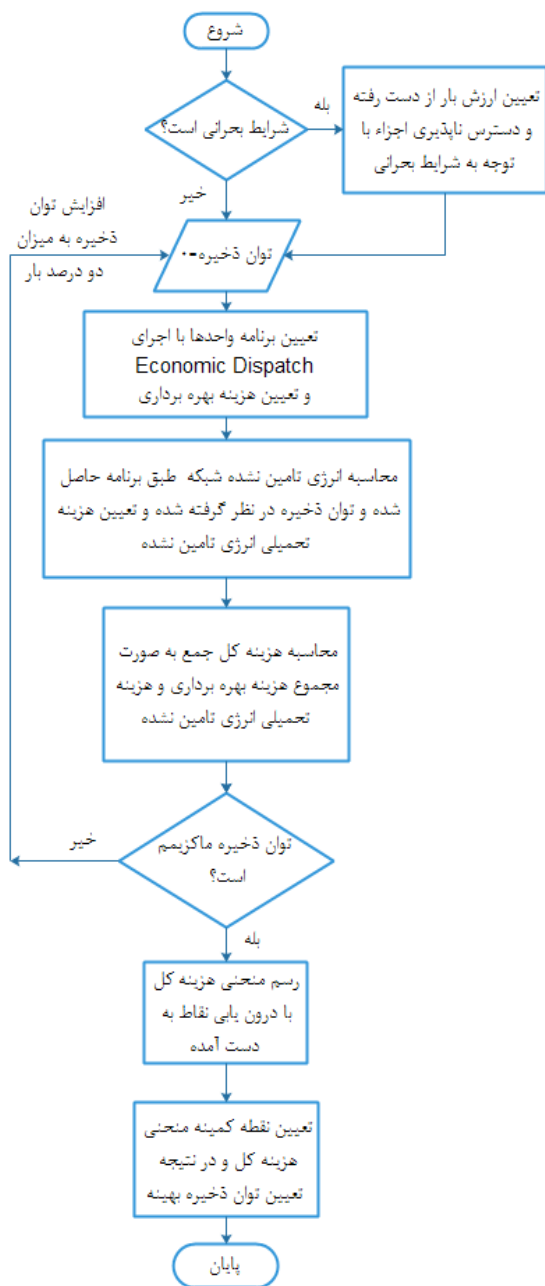


شکل ۶. شبکه تست ۲۴ باسه IEEE

در برخی از مراجع هزینه آماده‌باش برای تزریق توان ذخیره نصف هزینه تولید توان واحدها و در برخی از مراجع برابر با هزینه تولید توان آن‌ها در نظر گرفته شده است. توان ذخیره بیشینه واحدها از ضرب نرخ Ramp آن‌ها در زمان مورد نیاز برای تزریق توان ذخیره که ۱۰ دقیقه است، به‌دست می‌آید. جدول (۱) نرخ پیشنهادی واحدها برای تولید توان خروجی و توان ذخیره را برحسب \$/MW نشان می‌دهد.



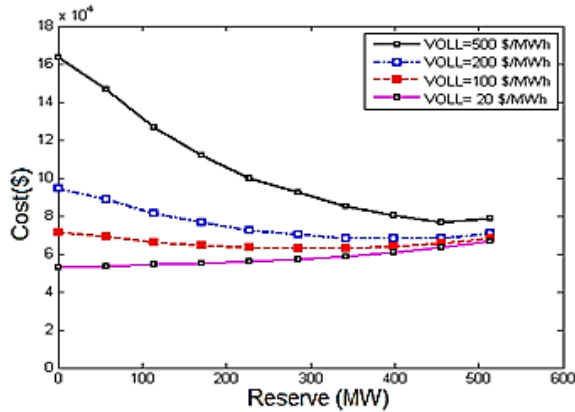
شکل ۴. مدل تحلیل قابلیت اطمینان در دو شرایط عادی و بحرانی



شکل ۵. روند نمای روش پیشنهادی برای تعیین توان ذخیره بهینه

توسط درون‌یابی ترسیم شده است. منحنی هزینه‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. نقطه کمینه منحنی هزینه کل میزان بهینه توان ذخیره را مشخص می‌کند که برای این شبکه برابر با ۴۵۶ مگاوات است. با در نظر گرفتن میزان توان ذخیره بهینه ۴۵۶ مگاوات و حل رابطه (۷) برنامه تولید تمامی واحدها مشخص می‌شود. دلیل بالابودن توان ذخیره بهینه (۱۶ درصد بار کل شبکه) قراردادن در شرایط بحرانی و زیادهبودن ارزش بار ازدست‌رفته است.

تأثیر ارزش بار ازدست‌رفته بر میزان بهینه توان ذخیره بهینه در شکل (۷) نشان داده شده است. برای مقادیر مختلف ارزش بار ازدست‌رفته منحنی هزینه کل شبکه رسم شده است. منطقی است که با کاهش ارزش بار ازدست‌رفته و میل کردن به سمت شرایط عادی، میزان بهینه توان ذخیره کاهش می‌یابد.



شکل ۷. توان ذخیره بهینه برای مقادیر مختلف VOLL

مشخص است که میزان توان ذخیره بهینه بسیار به میزان ارزش بار ازدست‌رفته و همچنین نرخ پیشنهادی واحدهای تولید برای تولید توان خروجی و یا آماده‌باش برای تزریق توان ذخیره بستگی دارد. روش‌های قطعی برای تعیین توان ذخیره میزان توان ذخیره را ۱۰ درصد کل بار شبکه (۲۸۵ مگاوات) و یا ظرفیت بزرگ‌ترین واحد تولید (۴۰۰ مگاوات) در نظر می‌گیرند. در کشورهای توسعه‌یافته که ارزش بار ازدست‌رفته بالاست و بازدهی واحدهای تولید نیز بالاست، میزان بهینه توان ذخیره نسبتاً بالا است.

نرخ خروج اجباری و یا دسترس‌ناپذیری واحدها و خطوط انتقال، از جمله پارامترهای دیگری هستند که بر توان ذخیره بهینه تأثیرگذار است. شکل (۸) تأثیر تغییر نرخ خروج اجباری واحدها بر توان ذخیره بهینه شبکه را نشان داده است. در این شکل منحنی هزینه کل برای دو حالت ترسیم شده است. در حالت اول نرخ خروج اجبار واحدها و خطوط انتقال همان میزان

از ابزار matpower نرم‌افزار متلب برای شبیه‌سازی شبکه و حل مسئله پخش بار بهینه استفاده شده است [۲۴]. با فرض یک‌ساعته‌بودن بازار انرژی، شبیه‌سازی شبکه تنها برای یک بازه زمانی یک‌ساعته انجام شده است. بار کل شبکه ۲۸۵۰ مگاوات فرض شده است. در یک شبکه واقعی بار کل شبکه و بار تک‌تک باس‌های آن از پیش‌بینی بار شبکه در بازه پیش رو تعیین می‌شود.

جدول ۱. نرخ پیشنهادی واحدها برای تولید توان خروجی و ذخیره

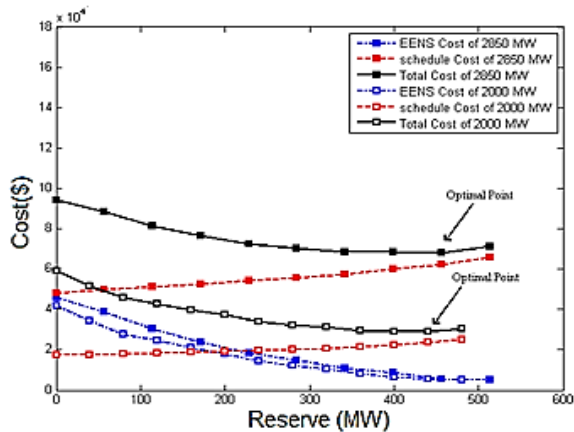
گروه واحدهای تولید	متصل به باس	پیشنهاد توان خروجی (\$/Mw)	پیشنهاد توان ذخیره (\$/Mw)
۱	۱	۱۳۰	۶۵
۲	۱	۱۸	۹
۳	۲	۱۳۰	۶۵
۴	۲	۱۸	۹
۵	۷	۵۳	۲۶/۵
۶	۱۳	۵۱	۲۵/۵
۷	۱۴ (کندانسور)	۰	-
۸	۱۵	۶۴/۴	۳۲/۲
۹	۱۵	۱۵	۷/۵
۱۰	۱۶	۱۵	۷/۵
۱۱	۱۸	۴/۶	۲/۳
۱۲	۲۱	۴/۶	۲/۳
۱۳	۲۲ (آبی)	۰	-
۱۴	۲۳	۱۵	۷/۵
۱۵	۲۳	۱۴/۶	۷/۳

در این شبکه ارزش بار ازدست‌رفته شبکه برای شرایط بحرانی به‌طور میانگین ۵۰۰ \$/MWh فرض شده است. ارزش بار ازدست‌رفته برای بارهای نظامی، صنعتی، تجاری و خانگی متفاوت است. می‌توان برای هر مصرف‌کننده (هر باس سامانه) باتوجه به نوع بار مصرف‌کننده یک ارزش بار ازدست‌رفته جداگانه در نظر گرفت. در این صورت رابطه (۷) به‌صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^I [c_i \times p_i + q_i \times r_i] + \sum_{j=1}^J EENS_j \times VOLL_j \right\} \quad (8)$$

$j$  در این رابطه بیانگر شماره باس مصرف (بار) است.

در این شبکه هزینه بهره‌برداری، هزینه تحمیلی انرژی تأمین نشده و منحنی هزینه کل برای توان ذخیره تا ۲۰ درصد بار مصرفی کل شبکه (۵۷۰ مگاوات) با گام‌های دو درصد بار کل سامانه (۵۷ مگاوات) تعیین شده است. منحنی بین این نقاط



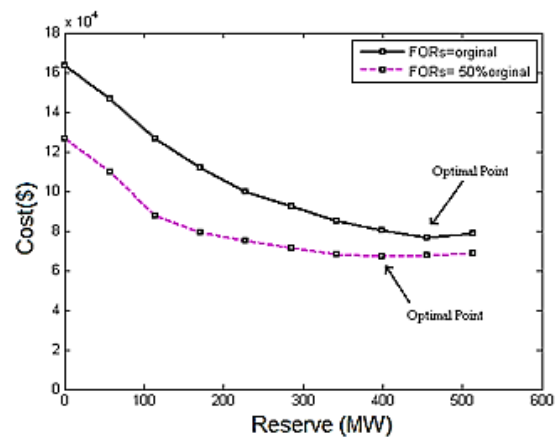
شکل ۹. منحنی هزینه‌ها برای دو حالت بار کل ۲۸۵۰ مگاوات و ۲۰۰۰ مگاوات

#### ۴. نتیجه‌گیری

استفاده از توان ذخیره ابزاری مهم و مناسب جهت مقابله با کمبود توان در شبکه برق است. تزریق توان ذخیره به مقدار کافی و در زمان مناسب سبب می‌شود تا در پی وقوع حادثه (حمله) تعادل بین مصرف و تولید برقرار گردد و از خروج‌های متوالی در شبکه برق جلوگیری شود. از آنجایی که برخلاف حوادث معمول شبکه، حمله به شبکه برق هوشمندانه است، تخصیص دقیق توان ذخیره در شرایط بحرانی از اهمیت دوچندانی برخوردار است.

در این مقاله روشی برای تعیین دقیق انرژی تأمین‌نشده سامانه به‌عنوان شاخصی مهم در تعیین میزان توان ذخیره، بر اساس پخش بار بهینه و روش مونت‌کارلو ارائه گردید. همچنین، روشی برای تعیین بهینه توان ذخیره بر اساس تحلیل هزینه-منفعت ارائه شد. در این روش توان ذخیره بهینه به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که مجموع هزینه بهره‌برداری و هزینه تحمیلی انرژی تأمین‌نشده کمینه شود. برخلاف روش‌های پیشین، تعیین انرژی تأمین‌نشده شبکه با استفاده از روش ارائه‌شده و همچنین استفاده از تحلیل هزینه-منفعت برای تعیین توان ذخیره بهینه سبب می‌شود تمامی پارامترهای دخیل در تعیین توان ذخیره بهینه در نظر گرفته شود. پارامترهایی نظیر ارزش بار ازدست‌رفته برای مصرف‌کنندگان، نرخ خروج اجباری تمام اجزاء شبکه، هزینه‌های حدی و نرخ پیشنهادی واحدهای تولید برای تولید توان خروجی، توپولوژی شبکه، تلفات شبکه، وجود جبران‌سازهای توان راکتیو و غیره در تعیین توان ذخیره بهینه در نظر گرفته شده است و تأثیر آن‌ها در تعیین توان ذخیره نشان داده شده است. در شرایط بحرانی، ارزش بار ازدست‌رفته و دسترس‌ناپذیری اجزاء شبکه افزایش می‌یابد. نتایج تست عملی نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده می‌تواند به‌طور مؤثری در تعیین توان ذخیره بهینه در شرایط بحرانی و عادی به‌کار رود.

تعیین‌شده در شبکه تست IEEE است [۲۳]. در این حالت فرض می‌شود که شبکه در شرایط بحرانی قرار دارد. در حالت دوم فرض می‌شود که با اعمال تمهیدات پدافند غیرعامل و مستحکم‌سازی شبکه، تمامی نرخ خروج اجباری واحدها و خطوط انتقال نصف حالت قبل است که بیانگر بهبود قابلیت اطمینان تمامی واحدها و خطوط انتقال است. در هر دو حالت ارزش بار ازدست‌رفته یکسان در نظر گرفته شده است. مشخص است که در حالت دوم که قابلیت اطمینان تمامی اجزاء بهبود یافته است، توان ذخیره بهینه کاهش می‌یابد. منحنی هزینه کل حالت دوم، برای توان ذخیره بیش‌تر از ۳۰۰ مگاوات تقریباً صاف و افقی است. این بدین معنا است که اگرچه در حالت دوم نقطه کمینه منحنی، توان ذخیره بهینه را حدود ۴۰۰ مگاوات مشخص می‌کند، می‌توان با در نظر گرفتن مقدار کم‌تر توان ذخیره مثلاً ۳۰۰ مگاوات همین مقدار هزینه کل را متحمل شد. در این صورت هزینه بهره‌برداری کاهش‌یافته ولی هزینه تحمیلی انرژی تأمین‌نشده افزایش می‌یابد. از آنجایی که با بهبود قابلیت اطمینان اجزاء احتمال بروز حادثه نیز کاهش یافته است، می‌توان با ریسک کم‌تری توان ذخیره کم‌تری برای شبکه در نظر گرفت و هزینه بهره‌برداری را کاهش داد.



شکل ۸. توان ذخیره بهینه برای مقادیر مختلف نرخ خروج اجباری واحدها

در پایان تأثیر بار مصرفی شبکه بر تعیین میزان بهینه توان ذخیره بررسی شده است. برای دو حالت بار مصرفی کل شبکه برابر با ۲۸۵۰ مگاوات و ۲۰۰۰ مگاوات و ارزش بار ازدست‌رفته برابر  $200 \text{ \$/MWh}$  منحنی‌های هزینه شبکه در شکل (۹) رسم شده است. در این شکل مشخص است که با کاهش حدود ۳۰ درصدی بار شبکه، هزینه بهره‌برداری و در نتیجه هزینه کل به‌صورت چشمگیری کاهش یافته است. هزینه تحمیلی انرژی تأمین‌نشده مقداری کاهش یافته است.



## ۵. مراجع

- [12] Holmgren, A.; Jenelius, E.; Westin, J. "Evaluating Strategies for Defending Electric Power Networks Against Antagonistic Attacks"; IEEE T Power Syst. 2007, 22, 76-84.
- [13] Ghaffarpour, R.; Hashemi, Y.; Ehsan, M. "Involving Defensive Approach in Unit Commitment Scheduling and Presenting Probability Model of Plants Inaccessibility"; Advance Defense Sci. Tech. 2015, 5, 231-246 (In Persian).
- [14] Wu, L.; Shahidehpour, M.; Li, T. "Cost of Reliability Analysis Based on Stochastic Unit Commitment"; IEEE Trans. on Power Syst. 2008, 23.
- [15] Chattopadhyay, D.; Baldick, R. "Unit Commitment with Probabilistic Reserve"; IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting 2002, 1, 280-285.
- [16] Wang, J.; Wang, X.; Wu, Y. "Operating Reserve Model in the Power Market"; IEEE T. Power Syst. 2005, 20, 223-229.
- [17] Wang, M. Q.; Gooi, H. B.; Chen, S. X. "Optimising Probabilistic Spinning Reserve Using an Analytical Expected-Energy-Not-Supplied Formulation"; IET Gener. Transm. Distrib. 2011, 5, 772-780.
- [18] Afshar, K.; Ehsan, M.; Fotuhi-Firuzabad, M.; Amjady, N. "Cost-Benefit Analysis and MILP for Optimal Reserve Capacity Determination in Power System"; Appl. Math. Comput. 2008, 196.
- [19] Shayesteh, E.; Yousefi, A.; ParsaMoghaddam, M. "A Probabilistic Risk-Based Approach for Spinning Reserve Provision Using Day-Ahead Demand Response Program"; Energy 2010, 35.
- [20] Aghaei J.; Shayanfar H.; Amjady N. "Joint Market Clearing in a Stochastic Framework Considering Power System Security"; Appl. Energy 2009, 86.
- [21] Ranjbar, M. H. "Optimal Allocation of Reserve Power in Electricity Market"; M.S. Thesis, Shahid Beheshti University, Dep. Electrical and Computer Eng., 2012 (In Persian).
- [22] "The IEEE Reliability Test System-1996"; IEEE T. Power Syst., 1999, 14, 1010-1020.
- [23] Zimmerman, R. D.; Murillo-Sanchez, C. E.; Gan, D. "User's Manual for MATPOWER – A Matlab Power System Simulation Package"; PSERC, Cornell University, New York, 2005.
- [1] Johansson, J. "Risk and Vulnerability Analysis of Interdependent Technical Infrastructures"; PhD. Thesis, Lund University, Dep. Measurement Technology and Industrial Electrical Eng. 2010.
- [2] Chen, G. "Attack Structural Vulnerability of Complex Power Grids: A Hybrid Approach based on Complex Networks"; Physica A 2010, 389, 595-603.
- [3] Yusta, J. M.; Correa, G. J.; Arantegui, R. L. "Methodologies and Applications for Critical Infrastructure Protection: State-of-the-Art"; Energy Policy. 2011, 10, 6100-6119.
- [4] Haimes, Y. Y.; Longstaff, T. "The Role of Risk Analysis in the Protection of Critical Infrastructures against Terrorism"; Risk Anal. 2002, 22, 439-444.
- [5] Zerriffi, H. "Electric Power Systems under Stress: An Evaluation of Centralized Versus Distributed System Architectures"; Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, Carnegie Institute of Technology, 2004.
- [6] Apostolakis, G. E.; Lemon, D. M. "A Screening Methodology for the Identification and Ranking of Infrastructure Vulnerabilities Due to Terrorism"; Risk Anal. 2005, 25, 361-376.
- [7] Amin, M. "Security Challenges for the Electricity Infrastructure"; Computer 2002, 35, 8-10.
- [8] Firouzi, H. "Introduction of Strategic Aspects of Electricity Network's Reliable Management from the Perspective of Crisis Management"; Passive Defense Quarterly 2013, 14, 11-18 (In Persian).
- [9] Johns, L. S.; Blair, P. D. "Physical Vulnerability of Electric Systems to Natural Disasters and Sabotage"; Office of Technology Assessment, U.S. Congress, Washington DC, Tech. Rep OT A-E-453, June 1990.
- [10] Chen, G.; Yang Dong, Zh.; Hill, D. J; Xue, Y. S. "Exploring Reliable Strategies for Defending Power Systems Against Targeted Attacks"; IEEE T. Power Syst. 2011, 26, 1000-1009.
- [11] Zimmerman, R.; Restrepo, C.; Dooskin, N.; Hartwell, N.; Miller, L.; Remington, W. "Electricity Case: Main Report - Risk, Consequences, and Economic Accounting"; Create, Tech. Rep., 2005.