

# مدل سازی کلیدزنی انتقال و محدودیت‌های پایداری آن در بازار احتمالاتی هم‌زمان انرژی و رزرو چرخان

رحمت اعظمی و محمودرضا حقی فام

انتقال می‌تواند به عنوان ابزاری برای بهره‌برداری اقتصادی بهتر از شبکه‌های انتقال و همچنین با توجه به اهداف مفهوم هوشمندسازی شبکه در جهت استفاده بهتر از زیرساخت‌های موجود، مورد استفاده قرار گیرد. در اکثر مطالعات سیستم قدرت به استثنای خروج‌های اجباری و تعمیرات، شبکه‌های انتقال به عنوان یک سیستم استاتیکی مدل‌سازی شده است. از دیدگاه سنتی، شبکه انتقال به عنوان یک شبکه پسیو شناخته می‌شود [۱] تا [۱۱] اما در شبکه‌های هوشمند کلیدزنی شبکه انتقال به عنوان یک عملیات متداول با توجه به تکنولوژی‌های تواناکننده آن مورد توجه قرار گرفته است. کلیدزنی انتقال می‌تواند باعث تغییر حالت سیستم قدرت شده و در نتیجه بر توان عبوری از خطوط و پروفایل ولتاژ شین‌ها اثرگذار باشد [۱] تا [۳] و [۱۲] تا [۱۶]. این ایده ابتدا در [۱] پیشنهاد شد و بعضی از موارد عملی کاربرد کلیدزنی انتقال در بازارهای برق دنیا در [۱] وجود دارد. کلیدزنی انتقال به عنوان روش کنترلی می‌تواند برای اهداف مدیریت تراکم، بازآرایی بهینه تولید، کاهش تلفات انتقال و بهبود امنیت مورد استفاده قرار گیرد.

مفهوم استفاده بهینه از شبکه انتقال در بازارهای برق ابتدا توسط O'Neill در [۴] ارائه شد. از دیدگاه اقتصادی، کلیدزنی انتقال می‌تواند مزیت‌های اقتصادی فراوانی را در مقایسه با دیگر روش‌ها فراهم آورد. علاوه بر آن به عنوان یک روش کنترلی سریع در هنگام اضطرار مورد استفاده قرار گیرد.

در [۵] مسأله یافتن بهره‌برداری بهینه تولید و توپولوژی شبکه با در نظر گرفتن یک سطح بار معین در قالب یک برنامه‌ریزی اعداد صحیح مورد نظر قرار گرفته است. مراجع [۶] و [۷] که ادامه کار [۵] می‌باشد به تحلیل حساسیت و آنالیز اقتصادی کلیدزنی انتقال پرداخته و افزایش کارایی اقتصادی موضوع را بیان می‌کنند.

یک مدل‌سازی هم‌زمان به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی و کلیدزنی انتقال با در نظر گرفتن  $N-1$  پیشامد در [۸] ارائه شده است.

در [۹] مدل‌سازی کلیدزنی انتقال در برنامه‌ریزی به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی با هدف جلوگیری از اضافه بار خطوط و اضافه ولتاژ شین‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های زاویه ایستایی در هنگام بستن خطوط ارائه شده است. در [۱۰] نویسندگان دو مفهوم را برای هوشمندسازی شبکه ارائه کردند و مدل ساده‌ای را برای مفاهیم گفته شده در پخش بار بهینه ساده ارائه داده‌اند.

اگرچه کلیدزنی شبکه انتقال در مقالات زیادی مورد بحث قرار گرفته اما قیود دینامیکی به طور ویژه مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیقات قبلی فقط عملکرد حالت ماندگار سیستم با کلیدزنی انتقال مدل‌سازی شده و اثرات دینامیکی آن نادیده گرفته شده که می‌تواند موجب ناپایداری شبکه بعد از عملکرد کلیدزنی انتقال شود.

چکیده: در این مقاله موضوع کلیدزنی شبکه انتقال در بازار احتمالاتی هم‌زمان انرژی و رزرو چرخان مدل‌سازی شده است. در مدل‌سازی انجام‌گرفته قیود دینامیکی متناظر با کلیدزنی شبکه انتقال در داخل مسأله بهینه‌سازی مدل شده است و هدف از بیان مسأله کمینه‌کردن هزینه تأمین بار، هزینه امنیت شبکه و جلوگیری از ناپایداری گذرا در هنگام بازکردن خطوط می‌باشد.

کلیدزنی انتقال در مقایسه با روش‌های دیگر همانند بازآرایی تولید و قطع بار می‌تواند به عنوان روشی کنترلی برای مدیریت پیشامدها در سیستم به کار گرفته شود.

در این مقاله با استفاده از مدل برنامه‌ریزی احتمالاتی غیر خطی اعداد صحیح، کلیدزنی انتقال در هنگام بهره‌برداری عادی و پیشامدها برای تعیین میزان بهینه انرژی و رزرو به کار گرفته شده است. برای بررسی کارایی استراتژی پیشنهادی سیستم تست ۱۴ شینه مورد مطالعه قرار گرفته است و مطابق با نتایج حاصل‌شده، استراتژی پیشنهادی هزینه‌های حدی انرژی و رزرو را کاهش داده است و از طرفی در نظر گرفتن محدودیت‌های دینامیکی باعث کم‌شدن اثرات کاهش هزینه در بازار می‌شود ولی ناپایداری گذرای سیستم و هزینه‌های ناپایداری را هنگام خروج خطوط مورد نظر قرار داده و هزینه‌های مرتبط با آن را کاهش می‌دهد.

کلید واژه: کلیدزنی انتقال، بازار احتمالاتی هم‌زمان انرژی و رزرو چرخان، برنامه‌ریزی احتمالاتی غیر خطی اعداد صحیح.

## ۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته، شبکه انتقال به عنوان یک بازیگر غیر فعال در بازارهای برق حضور داشته است اما اخیراً سیاست‌هایی جهت نقش‌آفرینی بیشتر شبکه‌های انتقال در بازارهای برق پیشنهاد شده است.

برای جذب سرمایه‌گذاری‌های بیشتر برای توسعه، هوشمندسازی شبکه‌های انتقال و افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی آنها، اخیراً سیاست‌هایی برای تأمین مشوق‌های مالی لازم جهت اهداف بیان‌شده پیشنهاد شده است. این سیاست‌ها شامل کلیدزنی شبکه انتقال، پیشنهاد بابت ظرفیت اضافی خطوط انتقال و خدمات قابل برنامه‌ریز شبکه انتقال در بازارهای برق می‌باشد. خدمات و ادوات موجود در شبکه انتقال می‌تواند عملیات‌های کنترلی متناوبی را برای مدیریت پیشامدها فراهم آورد. به عنوان مثال از کلیدزنی انتقال به عنوان روشی برای مدیریت تراکم در شبکه‌های برق استفاده شده است.

بر اساس دستورالعمل‌های کمیسیون ملی نظارت بر انرژی<sup>۱</sup>، کلیدزنی

این مقاله در تاریخ ۲۷ تیر ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۱۳ تیر ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

رحمت اعظمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات ایلام، ایلام، (email: azami.rahmat@yahoo.com).

محمودرضا حقی فام، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: haghifam@modares.ac.ir).

$$SUC(i, t) \geq (\mu(i, t) - \mu(i, t-1)) \times SUC(i) \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, NG \quad , \quad t = 1, \dots, NT$

محدودیت‌های افزایش توان بالارونده و پایین‌رونده واحدها

$$P(i, t) - P(i, t-1) \leq [1 - \mu(i, t)(1 - \mu(i, t-1))] \times RRU(i) + \mu(i, t) \times (1 - \mu(i, t-1)) \times P^{min}(i) \quad (5)$$

$$P(i, t-1) - P(i, t) \leq [1 - \mu(i, t)(1 - \mu(i, t-1))] \times RRD(i) + \mu(i, t-1) \times (1 - \mu(i, t)) \times P^{min}(i) \quad (5)$$

$i = 1, \dots, NG$

محدودیت‌های زمان روشن بودن و خاموش بودن واحدها

$$[X_{i(t-1)}^{on} - T_i^{on}] \times [\mu(i, t-1) - \mu(i, t)] \geq 0$$

$$[X_{i(t-1)}^{off} - T_i^{off}] \times [\mu(i, t) - \mu(i, t-1)] \geq 0 \quad (6)$$

$i = 1, \dots, NG \quad , \quad t = 1, \dots, NT$

محدودیت‌های رزرو با توجه به محدودیت نرخ افزایشی و کاهش توان واحدها

$$SR^{Up}(i, t) \leq RRU(i) \times 10 \cdot \min \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, NG \quad , \quad t = 1, \dots, NT$

$$SR^{Dn}(i, t) \leq RRD(i) \times 10 \cdot \min \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, NG \quad , \quad t = 1, \dots, NT$

$$P^{min}(i) \times \mu(i, t) + SR^{Dn}(i, t) \leq P(i, t) \leq P^{max}(i) \times \mu(i, t) - SR^{Up}(i, t) \quad (9)$$

$i = 1, 2, \dots, NG \quad , \quad t = 1, \dots, NT$

قیود تعادل بار و تولید در هر شین شبکه

$$\sum_{i=1}^{NGb} PG(i, t) - PL(b, t) = \sum_{i=1}^{Lb} V_b^* (G_i + \gamma_i \delta G_i) - V_b V_m (G_i \cos(\delta(n, t) - \delta(m, t)) + B_i \sin(\delta(n, t) - \delta(m, t))) \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{NGb} QG(i, t) - QL(b, t) = \sum_{i=1}^{Lb} -V_b^* (B_i + \gamma_i \delta B_i) - V_b V_m (G_i \sin(\delta(n, t) - \delta(m, t)) - B_i \cos(\delta(n, t) - \delta(m, t)))$$

$b = 1, 2, \dots, Nb$

قیود فلوی عبوری از خطوط شبکه با در نظر گرفتن خطوط قابل کلیدزنی

$$\begin{cases} V_n e^{j\delta_n(l, t)} (\gamma_l \delta \times (G_l + jB_k) V_n e^{j\delta_n(l, t)} + (G_l + jB_k) \times (V_n e^{j\delta_n(l, t)} - V_m e^{j\delta_m(l, t)}))^* - S(l, t) + (1 - Z(l, t)) \times M \geq 0 \\ V_n e^{j\delta_n(l, t)} (\gamma_l \delta \times (G_l + jB_k) V_n e^{j\delta_n(l, t)} + (G_l + jB_k) \times (V_n e^{j\delta_n(l, t)} - V_m e^{j\delta_m(l, t)}))^* - S(l, t) - (1 - Z(l, t)) \times M \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$l = 1, 2, \dots, NJ, \dots, NI \quad , \quad t = 1, \dots, NT$

محدودیت عبور توان از خطوط شبکه

$$-Z(l, t) \times S^{max}(l, t) \leq S(l, t) \leq Z(l, t) \times S^{max}(l, t) \quad (12)$$

$l = 1, \dots, NJ, \dots, NI \quad , \quad t = 1, \dots, NT$

محدودیت زاویه فاز ایستا در خطوط قابل کلیدزنی در هنگام بسته شدن خط

با توجه به تحقیقات انجام گرفته کلیدزنی خطوط می تواند راه حل مناسبی برای کاهش هزینه های بهره برداری باشد اما در بعضی حالت ها این کلیدزنی ممکن است باعث ناپایداری سیستم شده و باعث افزایش هزینه های امنیت شبکه شود. لذا در این مقاله به بررسی و مدل سازی کلیدزنی انتقال و محدودیت های دینامیکی آن در بازار احتمالاتی هم زمان انرژی و رزرو پرداخته شده است و با استفاده از این مدل سازی، بهره برداری ایمن با محدودیت های دینامیکی کلیدزنی انتقال تضمین شده است.

## ۲- مدل سازی مسأله

در سیستم های قدرت، تأمین مقدار مشخصی از ظرفیت رزرو برای جلوگیری از کمبود توان به خاطر خروج ناگهانی واحدهای تولیدی یا خطوط انتقال از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بهره برداران سیستم های قدرت معمولاً رزرو چرخان را با استفاده از روش های کنترلی همانند بازآرایی تولید و یا قطع بار تأمین می کنند و برای مدیریت پیشامدها به کار می گیرند. در این مقاله هدف از بازار احتمالاتی هم زمان انرژی و رزرو چرخان با در نظر گرفتن کلیدزنی انتقال، تعیین وضعیت به مدار آوردن واحدهای تولیدی و وضعیت کلیدزنی خطوط شبکه انتقال در بازار یک روز- پیش به منظور کمینه سازی هزینه بازار می باشد.

در [۱۱] و [۱۷] تا [۳۶] نمونه هایی از کاربرد برنامه ریزی احتمالاتی اعداد صحیح در علوم مختلف مهندسی و همچنین مهندسی برق برای به مدار آوردن واحدهای نیروگاهی بیان شده است. در این مقاله یک مدل کامل از برنامه ریزی احتمالاتی غیر خطی اعداد صحیح بر اساس [۲۰] تا [۳۶] ارائه شده است. در تابع هدف ارائه شده، بهره بردار سیستم قدرت به منظور کمینه سازی هزینه تأمین بار و رزرو چرخان با در نظر گرفتن قابلیت کلیدزنی در بعضی از خطوط شبکه انتقال، در دوره زمانی ۲۴ ساعته تابع هدف زیر را در نظر می گیرد

$$\min \sum_{t=1}^{NT} \left\{ \sum_{i=1}^{NG} (F_{ci}(P_{it}) \times \mu(i, t) + SUC(i, t) + \rho_{SP}^{Up}(i, t) SR^{Up}(i, t) + \rho_{SP}^{Dn}(i, t) SR^{Dn}(i, t)) \right\} + \sum_{c=1}^{NC} \Pr(c, t) \times \left\{ \sum_{b=1}^{Nb} VOLL(b, t) LC^c(b, t) \right\} \quad (1)$$

در تابع هزینه داده شده در (۱) هزینه های تأمین انرژی و راه اندازی واحدها در خط اول نشان داده شده است. خط دوم (۱) نشان دهنده هزینه رزرو بالارونده و پایین رونده واحدهاست و خط سوم هزینه امنیت شبکه با در نظر گرفتن قطع بار می باشد.

قیود متناظر با حالات ماندگار و پیشامدها در سیستم به صورت زیر می باشد.

## ۲-۱ قیود متناظر با حالت ماندگار برای تأمین انرژی و ظرفیت رزرو

قیود مربوط به واحدهای تولیدی به صورت زیر است

$$F_{ci}(P_{it}) = a + bP(i, t) + cP^v(i, t) \quad (2)$$

$$P^{min}(i) \times \mu(i, t) + SR^{Dn}(i, t) \leq P(i, t) \leq P^{max}(i) \times \mu(i, t) - SR^{Up}(i, t) \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, NG \quad , \quad t = 1, \dots, NT$

$$Q^{min}(i, t) \leq QG(i, t) \leq Q^{max}(i, t)$$

قیود متناظر با هزینه راه اندازی واحد

انتقال با نرخ خرابی  $\lambda_i$  است برای محاسبه احتمال هر پیشامد به صورت زیر عمل می‌کنیم

$$\Pr(c,t) = \prod_{i \in NGc} ORR(i,t) \times \prod_{l \in NLc} ORR(l,t) \quad (20)$$

$$ORR(i,t) \approx \lambda_i \times T \quad (21)$$

در رابطه بالا  $\lambda_i$  نرخ خرابی تجهیزات،  $NGc$  تعداد ژنراتورهای دچار خرابی پیشامد  $c$ ،  $NLc$  تعداد خطوط دچار خرابی در پیشامد  $c$  و  $T$  دوره تناوب بازار است.

در این مقاله برای در نظر گرفتن قیود دینامیکی مربوط به کلیدزنی خطوط انتقال از مدل کلاسیک ماشین سنکرون استفاده شده است. بنابراین معادلات مربوط به پایداری گذرا با در نظر گرفتن نیروی محرکه ثابت برای میدان تحریک به صورت زیر است

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}(i) &= \Omega_b \times (w(i) - 1) \\ \dot{w}(i) &= \frac{1}{M(i)} \times (P_G(i) - P_e(i)) \end{aligned} \quad (22)$$

در رابطه بالا  $P_G(i)$  قدرت مکانیکی واحد تولیدی است که به صورت ثابت در نظر گرفته شده است.  $\Omega_b$  نرخ فرکانس،  $w(i)$  و  $\gamma(i)$  به ترتیب سرعت روتور و زاویه روتور برای ژنراتور  $i$  ام و  $M(i)$  نیز ضریب لختی واحد است.

توان الکتریکی  $P_e(i)$  می‌تواند به صورت زیر نوشته شود

$$P_e(i,t) = E(i) \sum_j [B_{ij}(t) \times \sin(\gamma(i,t) - \gamma(j,t)) + G_{ij}(t) \times \cos(\gamma(i,t) - \gamma(j,t))] \quad (23)$$

در رابطه بالا  $E(i)$  نیروی محرکه الکتریکی میدان استاتور،  $B_{ij}(t)$  عنصر  $ij$  ام از ماتریس کاهش‌یافته سوسپتانس شبکه و  $G_{ij}(t)$  عنصر  $ij$  ام از ماتریس کاهش‌یافته کندکتانس شبکه است.

با استفاده از قانون دوزنقه‌ای، سرعت و زاویه روتور ژنراتور به  $n+1$  قطعه‌های زمانی به صورت گسسته زیر مدل‌سازی می‌شود

$$\begin{aligned} \gamma^{n+1}(i,t) &= \gamma^n(i,t) + \frac{\Delta t}{\tau} \times (w^{n+1}(i,t) + w^n(i,t) - 2) \\ w^{n+1}(i,t) &= w^n(i,t) + \frac{\Delta t}{\tau M(i,t)} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\times (PG(i,t) - Pe^n(i,t) + PG(i,t) - Pe^{n+1}(i,t))$$

$$n = 1, \dots, Nend, \quad i = 1, \dots, NG$$

$$Pe^n(i,t) = E(i) \sum_j [B_{ij}^n(t) \times \sin(\gamma^n(i,t) - \gamma^n(j,t)) + G_{ij}^n(t) \times \cos(\gamma^n(i,t) - \gamma^n(j,t))] \quad (25)$$

در رابطه بالا  $\Delta t$  طول قطعه‌های زمانی،  $n$  شمارنده قطعه زمانی و  $Nend$  تعداد قطعه‌های زمانی است.  $G^n(t)$  و  $B^n(t)$  با در نظر گرفتن خطوط قابل کلیدزنی به صورت زیر است

$$Y_{bus} = G_{bus} + jB_{bus} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \times Z^n(l,t) & \dots & y_{1n} \\ y_{12} \times Z^n(l,t) & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{1n} & \dots & \dots & y_{nn} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$Z^n(l,t) = Z(l,t - 1)$$

$$Z^n(l,t) = Z^{n+1}(l,t) = Z(l,t), \quad n = 2, \dots, Nend - 1$$

$$\begin{aligned} \delta_n(l,t) - \delta_m(l,t) \\ \leq \Delta\theta + Z(l,t-1) \times M + M \times (1 - Z(l,t)) \end{aligned} \quad (13)$$

$$t = 1, \dots, NT, \quad l = 1, \dots, NJ$$

محدودیت زاویه فاز هر شین

$$\begin{aligned} \delta_n^{\min}(l,t) \leq \delta_n(l,t) \leq \delta_n^{\max}(l,t) \\ l = 1, 2, \dots, NJ, \dots, Nk, \dots, NI \end{aligned} \quad (14)$$

## ۲-۲ قیود متناظر با حالات اتفاقات برای تأمین امنیت شبکه با در نظر گرفتن هزینه قطع بار

قید تعادل بار و تولید با توجه به پیشامدها

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{NGb} \xi^c(i,t) \times PG(i,t) + \sum_{i=1}^{NGb} \xi^c(i,t) \times SR^{Up}(i,t) \\ - \sum_{i=1}^{NGb} \xi^c(i,t) \times SR^{Dn}(i,t) + LC^c(i,t)(b,t) - PL(b,t) \\ = \sum_{l=1}^{Lb} \mu^c(l,t) \times V_b^* (G_l + \delta G_l) - V_b V_m (G_l \cos(\delta(n,t) \\ - \delta(m,t)) + B_l \sin(\delta(n,t) - \delta(m,t))) \\ \sum_{i=1}^{NGb} \xi^c(i,t) QG(i,t) - QL(b,t) \\ = \mu^c(l,t) \times \sum_{l=1}^{Lb} -V_b^* (B_l + \delta B_l) \\ - V_b V_m (G_l \sin(\delta(n,t) - \delta(m,t)) \\ - B_l \cos(\delta(n,t) - \delta(m,t))) \\ b = 1, 2, \dots, Nb, \quad c = 1, 2, \dots, NC \end{aligned} \quad (15)$$

محدودیت بار قطع شده

$$0 \leq LC^c(b,t) \leq PL(b,t) \quad (16)$$

فلوی عبوری از هر خط با در نظر گرفتن خطوط قابل کلیدزنی برای هر پیشامد

$$\begin{cases} V_n e^{j\delta_n(l,t)} (\delta \times (G_l + jB_k) V_n e^{j\delta_n(l,t)} \\ + (G_l + jB_k) \times (V_n e^{j\delta_n(l,t)} - V_m e^{j\delta_m(l,t)}))^* \\ - S^c(l,t) + \mu^c(l,t) \times (1 - Z(l,t)) \times M \geq 0 \\ V_n e^{j\delta_n(l,t)} (\delta \times (G_l + jB_k) V_n e^{j\delta_n(l,t)} \\ + (G_l + jB_k) \times (V_n e^{j\delta_n(l,t)} - V_m e^{j\delta_m(l,t)}))^* \\ - S^c(l,t) - \mu^c(l,t) \times (1 - Z(l,t)) \times M \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$l = 1, 2, \dots, NJ, \dots, NI, \quad t = 1, \dots, NT, \quad c = 1, \dots, NC$$

محدودیت زاویه فاز هر شین در پیشامدها

$$\begin{aligned} \delta_n^{\min}(l,t) \leq \delta_n(l,t) \leq \delta_n^{\max}(l,t) \\ l = 1, 2, \dots, NJ, \dots, Nk, \dots, NI \end{aligned} \quad (18)$$

محدودیت توان عبوری از خطوط در پیشامدها

$$\begin{aligned} -Z(l,t) \times \mu^c(l,t) \times S^{\max}(l,t) \leq S(l,t) \\ \leq Z(l,t) \times \mu^c(l,t) \times S^{\max}(l,t) \\ l = 1, \dots, NJ, \dots, NI, \quad t = 1, \dots, NT \end{aligned} \quad (19)$$

در ادامه یک مدل دوحالتی از واحدهای تولیدی و خطوط انتقال در نظر گرفته شده است. در یک شبکه که حاوی واحدهای تولیدی و خطوط

جدول ۱: میزان تولید ژنراتورهای شبکه قبل و بعد از کلیدزنی در مورد اول.

قبل از کلیدزنی	بعد از کلیدزنی
شبکه انتقال	شبکه انتقال
تولید ژنراتور ۱	۱۳۶ مگاوات
تولید ژنراتور ۲	۱۱۰ مگاوات
هزینه بهره‌برداری	۵۲۰۹ دلار

جدول ۲: هزینه سیستم در دوره ۲۴ ساعته قبل و بعد از کلیدزنی شبکه انتقال در مورد اول.

هزینه‌ها	قبل از کلیدزنی	بعد از کلیدزنی
هزینه بهره‌برداری کل	۱۲۰۵۴۰ دلار	۱۰۶۰۰۰ دلار
هزینه بازار انرژی	۱۰۵۲۸۲ دلار	۹۱۹۵۰ دلار
هزینه بازار رزرو چرخان	۵۶۵۸ دلار	۴۸۶۵ دلار
هزینه امنیت شبکه	۹۶۰۰ دلار	۹۱۸۵ دلار

جدول ۳: میزان تولید ژنراتورها قبل و بعد از کلیدزنی در مورد دوم.

قبل از کلیدزنی	بعد از کلیدزنی
شبکه انتقال	شبکه انتقال
تولید ژنراتور ۱	۱۲۹ مگاوات
تولید ژنراتور ۲	۱۱۷ مگاوات
هزینه بهره‌برداری	۵۹۲۰ دلار

مورد دوم: بهینه‌سازی بازار انرژی و رزرو چرخان با توجه به کلیدزنی شبکه انتقال و با در نظر گرفتن محدودیت‌های پایداری.

جدول ۱ نتایج اجرای بازار را برای ۹۵ درصد از بار پیک به عنوان نمونه برای مورد اول را نشان می‌دهد که در این مورد خطوط قابل کلیدزنی، خطوط ۲-۴، ۲-۵، ۳-۴ و ۱۰-۱۱ هستند. با اجرای برنامه برای ۹۵ درصد بار پیک، مشاهده می‌شود که خطوط ۲-۴، ۲-۵ و ۳-۴ جهت باز شدن انتخاب می‌شوند. در این مورد هزینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن خطوط قابل کلیدزنی حدود ۱۲ درصد کاهش یافته است.

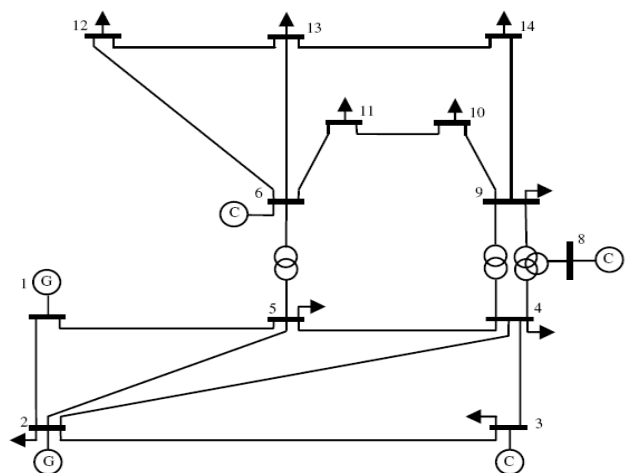
قیمت حدی در شین‌های شبکه در مورد اول به طور متوسط برابر ۵۴/۲ دلار است که شکل ۲ تغییرات قیمت حدی شین‌ها را در برابر تعداد خطوط قابل کلیدزنی نمایش می‌دهد. همچنین شکل ۳ تغییرات انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار را با در نظر گرفتن تعداد خطوط قابل کلیدزنی نمایش می‌دهد.

جدول ۲ میزان تأثیرات کلیدزنی انتقال را در بازار انرژی و رزرو چرخان در یک دوره برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته نمایش می‌دهد.

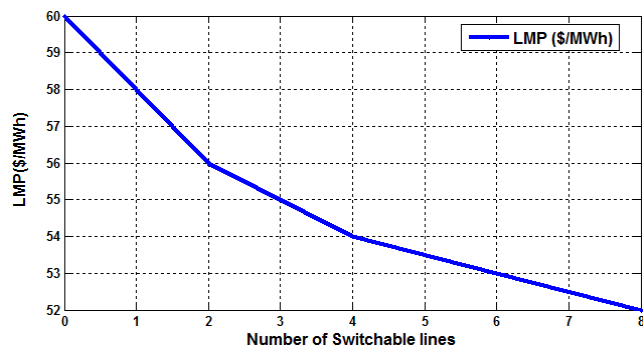
در مورد دوم خطوط قابل کلیدزنی، خطوط ۲-۴، ۲-۵، ۳-۴ و ۱۰-۱۱ هستند. با اجرای برنامه برای ۹۵ درصد بار پیک، مشاهده می‌شود که خط ۲-۴ جهت باز شدن انتخاب می‌شوند. در این مورد هزینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن خطوط قابل کلیدزنی حدود ۷ درصد کاهش یافته است. جدول ۳ نتایج اجرای بازار را برای ۹۵ درصد از بار پیک به عنوان نمونه برای مورد دوم نشان می‌دهد.

در مقایسه با مورد اول مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن قیود پایداری در هنگام بازکردن خطوط باعث کاهش اثرات کلیدزنی انتقال شده و در واقع میزان ذخیره‌سازی هزینه را کاهش می‌دهد. در واقع این افزایش هزینه را می‌توان هزینه جهت جلوگیری از ناپایداری در نظر گرفت.

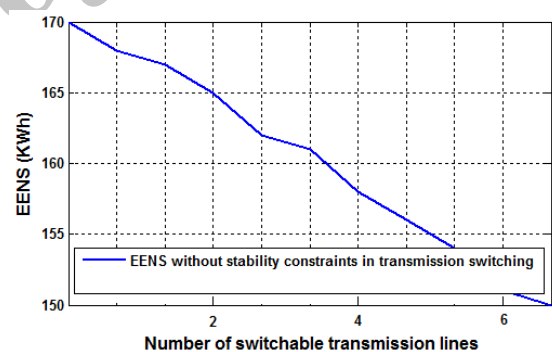
در شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات قیمت هزینه حدی و تغییرات انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار را با در نظر گرفتن محدودیت‌های پایداری نشان می‌دهد. جدول ۴ میزان تأثیرات کلیدزنی انتقال را در بازار انرژی و رزرو چرخان در یک دوره برنامه‌ریزی ۲۴ ساعته نمایش می‌دهد.



شکل ۱: سیستم ۱۴ شینه.



شکل ۲: تغییرات قیمت هزینه حدی با تغییرات تعداد خطوط قابل کلیدزنی.



شکل ۳: تغییرات انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار با تغییرات تعداد خطوط قابل کلیدزنی.

قید مربوط به زاویه ژنراتورها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$\gamma^n(i, t) - \frac{\sum_{k=1}^{NG} H_k \gamma^n(k, t)}{\sum_{k=1}^{NG} H_k} \leq \gamma^{critical}(i, t) \quad (27)$$

### ۳- نتایج عددی

به منظور نشان دادن اثرات کلیدزنی انتقال در کاهش هزینه‌های انرژی و رزرو چرخان، یک سیستم تست ۱۴ شینه (نشان داده شده در شکل ۱) در این قسمت مورد استفاده قرار گرفته و اطلاعات و مشخصات سیستم از [۳۷] گرفته شده است. نرخ خرابی برای خطوط ۰/۰۰۲ بار بر سال و برای ژنراتورها ۰/۰۰۵ بار بر سال در نظر گرفته شده است. موارد زیر جهت مطالعه در نظر گرفته شده است: مورد اول: بهینه‌سازی بازار انرژی و رزرو چرخان با توجه به کلیدزنی شبکه انتقال و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های پایداری.

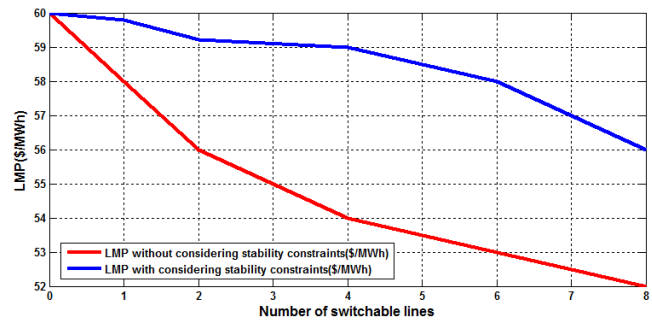
جدول ۴: هزینه سیستم در دوره ۲۴ ساعته قبل و بعد از کلیدزنی شبکه انتقال در موارد اول و دوم.

هزینه‌ها	قبل از کلیدزنی	بدون محدودیت پایداری	بعد از کلیدزنی با محدودیت پایداری
هزینه بهره‌برداری کل	۱۲۰۵۴۰ دلار	۱۰۶۰۰۰ دلار	۱۱۲۱۰۰ دلار
هزینه بازار انرژی	۱۰۵۲۸۲ دلار	۹۱۹۵۰ دلار	۹۷۴۹۸ دلار
هزینه بازار رزرو چرخان	۵۶۵۸ دلار	۴۸۶۵ دلار	۵۲۶۰ دلار
هزینه امنیت شبکه	۹۶۰۰ دلار	۹۱۸۵ دلار	۹۳۴۲ دلار

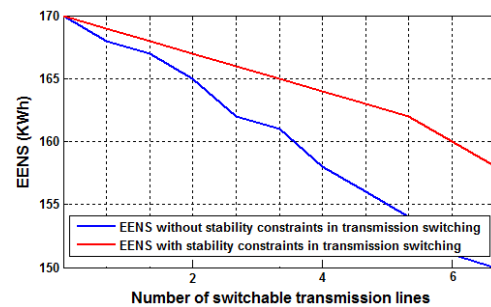
پایداری می‌تواند باعث کاهش ریسک ناپایداری گزرای سیستم شده و هزینه‌های ریسک ناپایداری گذرا را کاهش دهد.

### مراجع

- [1] H. J. Koglin and H. Muller, "Overload reduction through corrective switching actions," in *Proc. IEE Int. Conf. on Power System Monitoring and Control, London*, pp. 159-164, 1980.
- [2] J. G. Rolim and L. Machado, "A study of the use of corrective switching in transmission systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 336-341, Feb. 1999.
- [3] G. Tomonori, S. Tomonobu, Y. Atsushi, U. Naomitsu, and F. Toshihisa, "Optimal operation of thermal unit in smart grid considering transmission constraint," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 40, no. 1, pp. 21-28, Sep. 2012.
- [4] R. P. O'Neill, R. Baldick, U. Helman, M. H. Rothkopf, and W. Stewart, "Dispatchable transmission in RTO markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 171-179, Feb. 2005.
- [5] E. B. Fisher, R. P. O'Neill, and M. C. Ferris, "Optimal transmission switching," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1364-1355, Aug. 2008.
- [6] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, "Optimal transmission switching - sensitivity analysis and extensions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1469-1479, Aug. 2008.
- [7] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, "Optimal transmission switching with contingency analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1577-1586, Aug. 2009.
- [8] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, "Co - optimization of generation unit commitment and transmission switching with N-1 reliability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 1052-1063, May 2010.
- [9] A. Khodaei and M. Shahidehpour, "Transmission switching in security - constrained unit commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1937-1945, Nov. 2010.
- [10] K. W. Hedman, R. P. O'Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, "Smart flexible just-in-time transmission and flowgate bidding," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 93-102, Feb. 2011.
- [11] R. Aazami, K. Aflaki, and M. R. Haghifam, "A demand response based solution for LMP management in power markets," *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no. 5, pp. 1125-1132, Jun. 2011.
- [12] E. B. Makram, K. P. Thornton, and H. E. Brown, "Selection of lines to be switched to eliminate overload lines using a Z - matrix method," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 653-661, May 1989.
- [13] H. Glavitsch, "State of the art review - switching as means of control in the power system," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 92-100, Apr. 1985.
- [14] R. Bacher and H. Glavitsch, "Network topology optimization with security constraints," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 103-111, Nov. 1986.
- [15] G. Schnyder and H. Glavitsch, "Integrated security control using an optimal power flow and switching concepts," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 782-790, May 1988.
- [16] G. Schnyder and H. Glavitsch, "Security enhancement using an optimal switching power flow," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 674-681, May 1990.
- [17] R. Aazami and A. F. Fard, "Impact of demand response programs on system and nodal reliability of a deregulated power system," in *Proc. IEEE Int. Conf. Sustainable Energy Technologies, ICSET'08*, pp. 1262-1266, Singapore, 27-28 Nov. 2008.



شکل ۴: تغییرات قیمت هزینه حدی با تغییرات تعداد خطوط قابل کلیدزنی در موارد اول و دوم.



شکل ۵: تغییرات انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار با تغییرات تعداد خطوط قابل کلیدزنی در موارد اول و دوم.

نتایج بالا نشان می‌دهد که هر چند خروج و یا کلیدزنی خطوط راه حل مفیدی جهت کاهش هزینه بهره‌برداری است اما در برخی از موارد ممکن است باعث ایجاد ناپایداری گذرا در سیستم شود. بنابراین در نظر گرفتن ملاحظات پایداری در هنگام کلیدزنی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. هر چند با در نظر گرفتن ملاحظات پایداری در داخل مسأله بهینه‌سازی، از اثرات کلیدزنی انتقال در کاهش هزینه بهره‌برداری کاسته می‌شود به طوری که از نتایج بالا مشاهده شد که بدون ملاحظات پایداری، کاهش در هزینه‌های بهره‌برداری در حدود ۱۲ درصد است ولی با در نظر گرفتن معیارهای پایداری اثرات کاهش هزینه بهره‌برداری به حدود ۷ درصد کاهش یافته است. اما در عین حال این معیار پایداری می‌تواند باعث کاهش ریسک ناپایداری گذرا شده و هزینه‌های ریسک ناپایداری گذرا را کاهش می‌دهد.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل‌سازی کامل از کلیدزنی انتقال در بازار احتمالاتی هم‌زمان انرژی و رزرو چرخان با در نظر گرفتن ملاحظات پایداری گذرا در هنگام خروج خطوط قابل کلیدزنی ارائه شده است. در تابع هدف بازار احتمالاتی، هزینه تأمین انرژی بار و رزرو چرخان جهت تأمین امنیت شبکه در هنگام پیشامدها، با استفاده از برنامه‌ریزی احتمالاتی غیر خطی اعداد صحیح ارائه شده و جهت پایداری سیستم در هنگام کلیدزنی خطوط انتقال، معیار پایداری با در نظر گرفتن خطوط قابل کلیدزنی در داخل معادلات پایداری در مدل بازار اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چند خروج و یا کلیدزنی خطوط راه حل مفیدی جهت کاهش هزینه بهره‌برداری است اما در برخی از موارد ممکن است باعث ایجاد ناپایداری گذرا در سیستم شود. بنابراین در نظر گرفتن ملاحظات پایداری در هنگام کلیدزنی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. هر چند با در نظر گرفتن ملاحظات پایداری در داخل مسأله بهینه‌سازی، از اثرات کلیدزنی انتقال در کاهش هزینه بهره‌برداری کاسته می‌شود، اما در عین حال این ملاحظات

- [30] S. J. Stoyan and R. H. Kwon, "A two-stage stochastic mixed-integer programming approach to the index tracking problem," *Optim Eng. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 247-275, 2010.
- [31] M. Shahidehpour and Y. Fu, "Benders decomposition," *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 3, no. 2, pp. 20-21, Mar. 2005.
- [32] S. S. Nielsen and S. A. Zenios, "Scalable parallel Benders decomposition for stochastic linear programming," *Parallel Computing J.*, vol. 23, no. 8, pp. 1069-1088, Aug. 1997.
- [33] A. M. Geoffrion, "Generalized benders decomposition," *J. of Optimization Theory and Applications*, vol. 10, no. 4, pp. 237-260, Oct. 1972.
- [34] S. Granville, et al., *Mathematical Decomposition Techniques for Power System*, EPRI, Tech. Rep. 2473 6, 1988.
- [35] Y. Li and J. McCalley, "A general benders decomposition structure for power system decision problems," in *Proc. IEEE Conf. Electro/Information Technology, EIT'08*, pp. 72-77, 18-20 May 2008.
- [36] Y. Li, J. D. McCalley, and S. Ryan, "Risk-based unit commitment," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 7 pp. 24-28 June 2007.
- [37] *Power System Test Case Archive*, Univ. Washington, Dept. Elect. Eng., 2007. [https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm).
- [18] R. Aazami, A. H. Abassi, J. Shakeri, and A. F. Fard, "Impact of EDRP on composite reliability of restructured power systems," in *IEEE Bucharest Power Tech Conf., Bucharest, Romania*, 6 pp., 28 Jun. - 2 Jul. 2009.
- [19] A. Yousefi, T. T. Nguyen, H. Zareipour, and O. P. Malik, "Congestion management using demand response and FACTS devices," *Int J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 37, no. 1, pp. 78-85, May 2012.
- [20] C. M. Affonso and L. C. P. da Silva, "Potential benefits of implementing load management to improve power system security," *Int J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 704-710, Jul. 2010.
- [21] X. Fu and X. Wang, "Determination of load shedding to provide voltage stability," *Int J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 515-521, Mar. 2011.
- [22] L. Wu, M. Shahidehpour, and T. Li, "Stochastic security-constrained unit commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 800-811, May 2007.
- [23] Y. Fu, M. Shahidehpour, and Z. Li, "Security-constrained unit commitment with AC constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1538-1550, Aug. 2005.
- [24] F. Bouffard, F. D. Galiana, and A. J. Conejo, "Market-clearing with stochastic security - Part I: formulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1818-1826, Nov. 2005.
- [25] C. Corchero and F. Javier Heredia, "Two-Stage Stochastic Programming Model for the Thermal Optimal Day-Ahead Bid Problem with Physical Future Contracts, DR 2008/11 - EIO, UPC." <http://www-eio.upc.es/~corchero/>
- [26] Q. P. Zheng, J. Wang Panos, M. Pardalos, and Y. Guan, "Stochastic security constrained unit commitment models and solution algorithm," *INFORMS Annual Meeting*, Austin, TX, US, Nov. 2010
- [27] C. C. Carøe and R. Schultz, "A Two-Stage Stochastic Program for Unit Commitment under Uncertainty in a Hydro-Thermal Power System, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Feb. 1998.
- [28] S. Takriti, B. Krasenbrink, and L. S. Y. Wu, "Incorporating fuel constraints and electricity spot prices into the stochastic unit commitment problem," *Operation Research*, vol. 48, no. 2, pp. 268-280, Mar./Apr. 2000.
- [29] K. Saenchai, L. Benedicenti, and G. H. Huang, "A mixed-integer two-stage interval stochastic programming model for regional air quality management," *Environmental Informatics Archives*, vol. 5, pp. 168-176, 2007.

**رحمت اعظمی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۲ از دانشگاه های شهید چمران اهواز، دانشگاه تهران و دانشگاه تربیت مدرس تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ایلام و دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات ایلام می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مدیریت مصرف بار، بهره برداری بهینه از سیستم‌های قدرت، برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت.

**محمودرضا حقی فام** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۹، ۱۳۷۱ و ۱۳۷۴ از دانشگاه تبریز، تهران و تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: قابلیت اطمینان، اتوماسیون توزیع برق و بازار برق.