بررسي مدلهاي مختلف تخصيص تلفات
انتقال و مقايسه آنها[1]

نويسندگان: M. Connejo, M. Arroyo, A. L. Guijaro

ترجمه وتنظيم:

حسين شريعتي

۱.مقدمه:

يک روش مناسب براي تعيين قيمت در بازار برق استفاده از فروش ساعتي برق مي باشد. توليد کننده ها پيشنهاد ساعتي قيمت را براي انرژي را با توجه به ميزان توان ارائه مي کنند، خريداران نيز تقاضاي ساعتي انرژي را به همراه حداکثر قيمت در استطاعتشان را ارائه مي کنند. بهره بردار بازار توان، منحني تولي توليد کنندگان و منحني تقضاي خريداران را قطع مي دهد و قيمت بازار و ميزان توليد و خريد هر بازيگر را تعيين مي کند. بازار ساعتي معمولا يک روز قبل بسته مي شود تا زمان کافي براي بررسي امکان فيزيکي در اختيار باشد.

در اين سيستم بازار، تلفات به صورت صريح به حساب نمي آيند. در زمان بهره برداري ميزان مصرف مصرف کنندگان و ميزان توان توليدي توليد کنندگان اندازه گيري مي شود و تفاوت اين دو بيانگر ميزان تلف در سيستم ما مي باشد. به طور طبيعي اين سوال که "چه کسي بايد هزينه اين تلفات را بپردازد " بروز مي کند. ميزان اين پرداخت بسيار قابل توجه است و هم توليد کنندگان و هم مصرف کنندگان مسئول اين پرداخت هستند چون اين تلفات ناشي از تبادل انرژي و استفاده آنها از شبکه قدرت براي انتقال توان مي باشد.

متاسفانه تلفات تابعي غير خطي از جريان خطوط هستند، وبه اين خاطر قادر به مشخص کردن ميزان توان مربوط به يک توليد کننده يا مصرف کننده خاص در خطوط نيستيم، در ضمن اگر از تکنيک خطي کردن نيز استفاده کنيم، با معادلات درجه ۲ اختصاص تلف مواجه مي شويم که اجازه اختصاص مستقيم تلفات را به ما نمي دهد.

اين حقايق نياز به يک مکانيزم واحد در سيستم قدرت را براي اختصاص تلفات بيان مي کنند. در اين مقاله مکانيزم هاي مختلف اختصاص تلفات را که در مقالات مختلف ارائه شده اند را بيان مي کنيم وتلاش مي کنيم تا مقايسه اي بين اين روشها نيز ارائه دهيم.

مکانيزم هاي ارائه شده عبارتند از: ۱.pro rata ۲. Marginal procedure ۳.proportional sharing

ابتدا به شرح مختصر آنها مي پردازيم سپس مقايسه اي مختصر بين آنها انجام مي دهيم.(مدل هاي بر پايه مدار و آنها که بر اساس بازار دو جانبه تلف را اختصاص مي دهند از اين چارچوب بيرون هستند)

Pro rata: تلفات به طور مساوي بين مصرف کنندگان و توليد کنندگان تقسيم مي شود، اين تقسيم متناسب با ميزان توليد (مصرف) توليد کنندگان (مصرف کنندگان) مي باشد. اين رويه در بازار برق اسپانيا اجرا مي شود با اين تفاوت که تمام تلفات به مصرف کنندگان تخصيص داده مي شود.

---

[1] "Transmission Loss Allocation: a Comparison of Different Practical Algorithm", IEEE Transaction on Power System, Vol. 17, No. 3, August 2002.

Marginal procedure: تلفات به توليد كنندگان ومصرف كنندگان به طور مساوي با استفاده از ضرايب هزينه افزايشي تلفات (ITL) انجام مي گيرد. بعد از اين تخصيص انجام نرماليزاسيون مورد نياز است، .مرجع {۷} نتايج پياده سازي اين روش را در بازار برق نروژ بيان كرده است.

Proportional sharing procedure: استفاده از نتايج همگراي پخش بار به علاوه اصل تقسيم متناسب، اين روش را امكان پذير مي كند كه تلفات را هم به توليدكنندگان و هم مصرف كنندگان اختصاص دهد. اين اصل بيان مي كند كه: "جريان تواني كه از هر خط حامل توان به باس مي رسد، از خطوطي كه توان را تخليه مي كنند، به تناسب پخش بارشان، باس را ترک مي كند"، كه نه قابل اثبات است و نه قابل رد.

روش Pro rata به طور ساده قابل فهم و پياده سازي مي باشد. هرچند اثر شبكه را در نظر گرفته نمي شود و با مصرف كننده اي كه نزديک باس توليد قرار گرفته همانطور برخورد مي شود كه با مصرف كننده اي كه در فاصله اي دور قرار دارد. اين براي باري كه در نزديكي توليد قرار دارد ناعادلانه است.

روش استاندارد Marginal procedure كه بر ضرايب ITL استوار است به انتخاب باس اسلک وابسته است، به اين خاطر كه اين ضرايب به باس اسلک وابسته اند. طبق تعريف اين ضرايب براي باس اسلک صفر در نظر گرفته مي شوند، در نتيجه هيچ تلفي به ژنراتور اسلک اختصاص نمي يابد. اين يک محدوديت موثر براي اين روش به حساب مي آيد و نيازمند آن است كه بازيگران بازار بر انتخاب اسلک به توافق برسند. به علاوه ضرايب ITL مي توانند مثبت و يا منفي باشند، يعني مي توانيم اختصاص منفي تلفات را نيز به يک باس داشته باشيم، كه اين مي تواند به عنوان سوبسيد نادرست برداشت شود. اين نوع قيمت گذاري مي تواند براي جلوگيري از سوبسيد، اصلاح شود كه در اين صورت به اين روشها "اختصاص نهايي غير سوبسيدي" (unsubsidized Marginal allocation) اطلاق مي شود.

روش Proportional sharing بر اساس قوانين الكتريكي، نياز به فرض گرفتن اصل تقسيم متناسب مي باشد. با اين فرض تلفات با يک تابع خطي اختصاص مي يابند، براي اختصاص تلف به تقاضا(Demand)، اين متد بر يک اصل ساده تكيه مي كند: "تلفات وابسته به هر خطي كه جريان آن وارد باس مورد نظر مي شود به خط هايي كه جريان آنها باس را ترک مي كند(يا Demand)، متناسب با جريان آن خط ها(خارج شونده ها) انتقال مي يابند". اين بايد مورد توجه قرار بگيرد كه در اين حالت تمام تلف به مصرف كننده تخصيص داده مي شود. به همين ترتيب براي اختصاص تلفات به توليد كنندگان از اين اصل استفاده مي شود كه: "تلفات وابسته به هر خطي كه جريان آن باس را ترک مي كند به خط هايي كه جريان آن ها به باس مربوطه مي ريزد(يا ژنراتورها) متناسب با جريان آنها (وارد شونده ها) انتقال مي يابد". در اين حالت برعكس حالت قبل است و تمام تلفات به توليد كنندگان تخصيص داده مي شود. اطلاعات پايه براي اين متد، پخش بار حقيقي و تلفات در همه خطوط و ميزان توليد و تقاضاي قدرت در شبكه مي باشند.

بايد تاكيد شود كه هدف از Loss allocation ارائه يک دستور العمل براي تخصيص تلفات به توليد كنندگان و مصرف كنندگان مي باشد. در نتيجه يک مكانيزم اقتصادي بعد از تقسيم بار است كه با مسائل خطوط انتقال در گير نمي شود.

با توجه به این نکته که یک روش واحد و ایده آل وجود ندارد، هر الگوریتم اختصاص تلفات باید خصوصیات زیر را دارا باشد:

۱. با نتایج پخش بار سازگار باشد.
۲. به میزان انرژي تولید شده و مصرف شده وابسته باشد.
۳. به مکان در شبکه برق وابسته باشد.
٤. از فرار از پرداخت این هزینه جلوگیري کند.
٥. سیگنال هاي نهایي اقتصادي مناسب تولید کند.
٦. پیاده سازي آن ساده باشد.

در بخش دوم جزئیات روش هاي مختلف تخصیص بیان مي شود، در بخش سوم این روش ها را روي مدل نمونه پیاده و بررسي مي شوند و در بخش آخر نتیجه گیري خواهد شد.

۲. مدل هاي اختصاص تلفات خطوط انتقال:

در ابتدا باید یاد آوري شود که جمع کل توان تولیدي باید با مصرف وتلفات برابر شود:

(۱)

$$P_G = P_D + L, \quad P_G = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}, \quad P_D = \sum_{j=1}^{N_D} P_{Dj}$$

که در آن:

P_G : مجموع توان تولیدي
P_{Gi} : توان خروجي ژنراتور iام
P_D : مجموع تقاضاي توان
P_{Dj} : تقاضاي توان اکتیو مصرف کننده jام
N_G : تعداد باس هاي تولید کننده
N_D : تعداد باس هاي تقاضا

براي آسان تر شدن فرض مي شود که در هر باس حداکثر یک ژنراتور و یک تقاضا مي باشد، پس بین باس i و تولید یا مصرف i تفاوتي وجود ندارد.

الف) Pro rata allocation(PR):

متد PR تلفات را به طور مساوي بین مصرف کننده و تولید کننده تقسیم مي کند:

(۲)

$$L_{Gi} = \frac{L}{2}\frac{P_{Gi}}{P_G}, \quad L_{Dj} = \frac{L}{2}\frac{P_{Dj}}{P_D}$$

که در آن L_{Gi} تلف اختصاص داده شده به ژنرلتور h و L_{Dj} تلف اختصاص داده شده به مصرف کننده j مي باشد.
ضرایب اختصاص تلف تلف به صورت زیر محاسبه مي شوند:
(۳)

$$L_{Gi} = \frac{L}{2}\frac{P_{Gi}}{P_G} = K_G P_{Gi}, \quad K_G = \frac{1}{2}\frac{L}{P_G}$$

(٤)

$$L_{Dj} = \frac{L}{2}\frac{P_{Dj}}{P_D} = K_D P_{Dj}, \quad K_D = \frac{1}{2}\frac{L}{P_D}$$

باید یادآوري شود که ضریب اختصاص تلف K_G براي تمام باس هاي تولید و K_D براي تمام باس هاي مصرف صادق هستند(تمام این ضرایب مثبت هستند).

ب) Marginal allocation (ITL):

این متد ضرایب ITL را استفاده مي کند تا تلفات را به طور متناسب به تولید کننده و مصرف کننده اختصاص دهد. ضرایب ITL به راحتي از نتایج پخش بار منتج مي شوند. ضریب ITL براي یک باس تغییرات تمام تلفات تولیدي را که با تغییر افزایشي توان تزریقي در آن باس تولید مي شوند فراهم مي کند. در نتیجه:
(٥)

$$K_i = \frac{\partial L}{\partial (P_{Gi} - P_{Di})}$$

که در آن K_i ضریب ITL مربوط به باس I است. باید توجه شود که ضریب ITL براي باس اسلک طبق تعریف صفر در نظر گرفته مي شود.
محاسبات براي اختصاص تلف به ژنراتورi و مصرف کننده j به صورت زیر بیان مي شود:
(٦)

$$L_{Gi} = P_{Gi}\frac{\partial L}{\partial P_{Gi}} = P_{Gi} K_i$$

(٧)

$$L_{Dj} = P_{Dj}\frac{\partial L}{\partial P_{Dj}} = -P_{Dj} K_j$$

هرچند در نتیجه غیر خطي بودن، جمع این تلفات برابر کل تلفات سیستم نمي شود:

$$L \neq \sum_{i=1}^{N_G} L_{Gi} + \sum_{j=1}^{N_D} L_{Dj}$$
(۸)
$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}K_i - \sum_{j=1}^{N_D} P_{Dj}K_j = L'$$

در نتيجه از نرماليزه كردن براي اختصاص مقدار دقيق استفاده مي شود:

$$L = L'\frac{L}{L'} = \left(\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}K_i - \sum_{j=1}^{N_D} P_{Dj}K_j\right)\frac{L}{L'}$$
(۹)
$$= \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}K'_i - \sum_{j=1}^{N_D} P_{Dj}K'_j$$

كه در آن $K_i' = K_i(L/L')$ ضريب ITL نرماليزه شده براي باس i مي باشد.
در نهايت تلفات اختصاص داده شده به هر ژنراتور و مصرف كننده به صورت زير در مي آيد:

(۱۰)
$$L'_{Gi} = P_{Gi}K'_i, \quad L'_{Dj} = -P_{Dj}K'_j$$

بايد توجه شود كه اين روش نهايي ممكن است تلف منفي به ژنراتور يا مصرف كنندگان تخصيص دهد، و اين تلف منفي به عنوان سوبسيد نادرست برداشت شود.

ج) اختصاص نهايي غير سوبسيدي:

متد ITL غير سوبسيدي (U-ITL) ضرايب ثابت ITL را به طوري اصلاح مي كند كه از اختصاص تلف منفي جلوگيري مي كند. در نتيجه يک سري از ITL ها براي ژنراتور ها و سري ديگر براي مصرف كننده ها به صورت مستقل تعريف مي شوند، بايد تاكيد شود كه هدف از اين متد ارائه يک روش براي اختصاص هزينه تلف است نه توضيح فيزيكي علت آن.
ضرايب ITL محاسبه شده براي باس اسلک، به راحتي قابل انتقال به يک اسلک باس ديگر با استفاده از ضرايب ترجمه هستند.
تمام تلفات به صورت زير محاسبه مي شود:
(۱۱)
$$L = \sum_{i=1}^{N} K'_i P_i$$

که در آن K'_i ضریب نرمالیزه شده ITL براي باس i، P_i توان خالص تزریقي به باس i مي باشند($P_i = P_{Gi} - P_{Di}$).
کل تلفات نیز به صورت زیر بیان مي شود:
(۱۲)

$$L = \sum_{i=1}^{N} (P_{Gi} - P_{Di}) = \sum_{i=1}^{N} P_i$$

با ضرب رابطه (۱۱)، در β ($0 \le \beta \le 1$)و (۱۲) و $1-\beta$ وجمع آن دو تلفات کل مي تواند به این صورت بیان شود:
(۱۳)

$$L = \sum_{i=1}^{N} \beta K'_i P_i + \sum_{i=1}^{N} (1-\beta) P_i$$

که در نتیجه:
(١٤)

$$L = \sum_{i=1}^{N} [\beta K'_i + (1-\beta)] P_i = \sum_{i=1}^{N} K_i P_i$$

که $\beta K'_i + (1-\beta)$ یک ضریب ITL جدید را $K_i = \beta K'_i + (1-\beta)$ تشکیل مي دهند.
در رابطه با تولید، تغییر باس اسلک به صورتي انجام مي پذیرد ضرایب ITL براي ژنراتوري که کمترین ITL را داراست صفر شود، این باعث مي شود که ضریب منفي به به هیچ ژنراتوري نسبت داده نشود، به صورت جمله پایین تکمیل مي شود.
فرض کنیم K'_{Gk} کمترین ضریب نرمالیزه شده ITL باشد، ضریب جابجایي β_G به صورت زیر محاسبه مي شود:

(۱۵)

$$K_{Gk} = 0 = \beta_G K'_{Gk} + (1-\beta_G)$$

$$\beta_G = \frac{1}{1 - K'_{Gk}}$$

در نتیجه ضرایب جدید ITL براي ژنراتور ها به صورت در مي آیند:
(١٦)

$$K_{Gi} = \beta_G K'_{Gi} + (1-\beta_G)$$

اين ضرايب دوباره نرماليزه مي شوند تا ۵۰% تاف را به ژنراتور ها اختصاص دهند.

در رابطه با مصرف کنندگان ضرايب تبديل β_D از رابطه زير بدست مي آيند:

(۱۷)

$$K_{Dm} = 0 = \beta_D K'_{Dm} + (1 - \beta_D)$$

که K'_{Dm} بزرگترين ضريب ITL براي مصرف کننده هاست. معادله (۱۷)ضمانت مي کند که هيچ مصرف کننده اي ضريب ITL منفي نگيرد.

از (۱۷)، $\beta_D = 1/(1 - K'_{Dm})$.

در نهايت ضرايب ITL براي مصرف کنندگان به صورت زير در مي آيد:

(۱۸)

$$K_{Dj} = \beta_D K'_{Dj} + (1 - \beta_D).$$

در نهايت اين ضرايب هم نرماليزه مي شوند تا ۵۰% از تلفات به مصرف کنندگان اختصاص يابد.

د) Proportional sharing allocation:

براي آسودگي خوانندگان در اين قسمت الگوريتم Proportional sharing (PS) "باياِلک"(Bialek) به طور خلاصه بيان مي شود.([9],[10])

تلفات ابتدا به مصرف کنندگان تخصيص داده مي شود، سپس به توليد کنندگان. در ارتباط با مصرف کنندگان، کل تقاضاي ناخالص شامل تلفات(P_D^G) به صورت زير به دست مي آيد:

(۱۹)

$$P_D^G = P_D + L \quad \text{and} \quad P_D^G = \sum_{j=1}^{N_D} P_{Dj}^G$$

که در آن P_{Di}^Gتقاضاي ناخالص باس i است.

کل تقاضاي ناخالص برابر با کل ميزان توليد مي باشد بنا بر اين $P_G = P_D^G$. با استفاده از اصل "تقسيم متناسب"(PS) بالانس قدرت در هر باس از يک شبکه متعادل بدون تاف به صورت زير در مي آيد:

(۲۰)

$$P_i^G = P_{Gi} + \sum_{j \in \alpha_i} c_{ji} P_j^G, \qquad \forall i = 1, \ldots, N$$

با:

(۲۱)

$$c_{ji} = \frac{P_{ji}^G}{P_j^G} \approx \frac{P_{ji}}{P_j}$$

که در آن:

P_i^G : توان ناخالص تزريقي به باس i

P_{Gi} : توليد در باس i

$\sum_{j\in\alpha_i} c_{ji}P_j^G$: جريان تواني كه به باس i از خطوط متصل به آن مي رسد

α_i : مجموعه باس هايي كه جريان توان آنها به سمت باس i است

P_{ji}^G : جريان ناخالص توان از باس j به باس i.

P_{ji} : جريان حقيقي توان از باس j به باس i (اندازه گيري شده در j)

P_j : توان حقيقي تزريق شده در باس j.

معادله ۲۰ از يک سيستم با معادلات خطي تشكيل مي شود كه به راحتي براي P_i^G i=1,…,N حل مي شود. ميزان ناخالص مصرف و تلفات به صورت زير محاسبه مي شوند:

(۲۲)

$$P_{Dj}^G = \frac{P_j^G}{P_j} P_{Dj} \quad \text{and} \quad L_{Dj} = P_{Dj}^G - P_{Dj}.$$

به همين ترتيب مي توان تلفات ژنراتور ها را نيز اختصاص داد. تمام توليد ناخالص به همراه تلفات به صورت زير تعريف مي شود:

(۲۳)

$$P_G^G = P_G + L \quad \text{and} \quad P_G^G = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}^G$$

كه P_{Gi}^G توليد ناخالص باس i(شامل تلفات) است.

اين توليد ناخالص بايد با مصرف برابر باشد، پس $P_G^G = P_D$. با استفاده از اصل "تقسيم متناسب"(PS)، بالانس توان در باس i، براي يک شبكه بدون تلف متعادل به صورت زير در مي آيد:

(۲٤)

$$P_i^G = P_{Di} + \sum_{j\in\gamma_i} c_{ji} P_j^G, \qquad \forall i = 1, \ldots, N$$

كه در آن:

P_i^G : توان خالص تزريقي به باس i.

P_{Di} : مصرف در باس i

$\sum_{j\in\gamma_i} c_{ij} P_i^G$: جريان تواني كه باس I را ترک مي كند

γ_i: مجموعه باس هايي كه توان را از باس i مي كشند

معادله ٢٤ از يک سيستم با معادلات خطي تشكيل مي شود كه به راحتي براي P_i^G i=1,...,N حل مي شود. توليد جديد و تلفات به صورت زير محاسبه مي شوند:

(٢٦)

$$P'_{Gi} = \frac{P^G_{Gi} + P_{Gi}}{2} \quad \text{and} \quad P'_{Dj} = \frac{P^G_{Dj} + P_{Dj}}{2}.$$

تلف نهايي اختصاص داده شده به هر ژنراتور و مصرف به صورت زير است:

(٢٧)

$$L'_{Gi} = P_{Gi} - P'_{Gi} \quad \text{and} \quad L'_{Dj} = P'_{Dj} - P_{Dj}.$$

در نهايت، ضرايب اختصاص تلف به توليد كنندگان و مصرف كنندگان به صورت زير محاسبه مي شوند:

(٢٨)

$$K_{Gi} = 1 - \frac{P'_{Gi}}{P_{Gi}} \quad \text{and} \quad K_{Dj} = \frac{P'_{Dj}}{P_{Dj}} - 1.$$

نتيجه گيري:

با بررسي نتايج مختلف پياده سازي ها، نتايج زير برداشت مي شود:

متدITL باعث فرار زياد و ايجاد تخصيص تلف منفي مي شود، همچنين ممكن است باعث ايجاد ناتعادلي زياد در تخصيص تلف بين توليد كنندگان و مصرف كنندگان شود، براي مثال به ژنراتور ها ١٤٦% از تلفات و به مصرف كنندگان ٤٦- % اختصاص يافته است.

متد U-ITL همان همان حاشيه اي بودن ITL را حفظ مي كند در حالي كه از فراريت جلوگيري مي كند.

اختصاص در U-ITL شبيه همان ITL است، با اين تفاوت كه از سوبسسيد جلوگيري مي كند.

اگرچه در " تقسيم متناسب"(PS) به شبكه توجه مي شود ولي روند تقسيم تلفات در آن شبيه روش PR مي باشد.

متد PR به شبكه در تخصيص تلفات توجهي نمي كند، و نتايج كاملا متفاوتي با ديگر متد ها توليد مي كند.

جدول ١ مقايسه كيفيتي بين روش هاي مختلف تخصيص ارائه مي كند.

جدول١: مقايسه كيفيتي روشهاي مختلف تخصيص تلفات

	Methods compared			
Characteristics	PR	ITL	U-ITL	PS
Is it quantity dependent?	yes	yes	yes	yes
Is it network dependent?	no	yes	yes	yes
Does it depend on the slack bus?	no	yes	no	no
Does it require linearity?	yes	no	no	yes
Is it marginal?	no	yes	yes	no
Does it produce negative losses?	no	yes	no	no
Is it volatile?	no	yes	no	no
Is it easy to understand?	yes	yes	yes	yes
Is it simple to implement?	yes	yes	yes	yes

توصيه هاي نهايي به قرار زير مي باشند:

روش Pro rata قابل پيشنهاد نيست، چون براي گروهي از توليد كنندگان و مصرف كنندگان غير عادلانه است. با ژنراتور هاي نزديک به مركز بار ها، در غياث با ژنراتور هايي كه در فاصله دور از مركز بار ها قرار دارند، به صورت غير عادلانه برخورد مي شوند. به همين ترتيب تقاضا هاي نزديک ژنراتور ها در غياث با بار هاي دور از ژنراتور ها، غير عادلانه مورد برخورد قرار مي گيرند.

اگر باس اسلک ثابت باشد، فراريت، اختصاص منفي و نامتعادلي تخصيص قابل قبول است و متد ITL قابل پيشنهاد است.

اگر فراريت، تلاف منفي ونا تعادلي غير قابل تحمل بود متد U-ITL و " تقسيم متناسب" (PS) توصيه مي شود.