شرکت برق منطقه‌ای اصفهان

نصب بهینه خازن‌های موازی در سیستمهای توزیع

رسول کنارنگی

گروه مهندسی برق ـ دانشگاه تبریز

چکیده :

در این مقاله کمپانزه نمودن شبکه‌های توزیع توسط خازنهای موازی مورد بررسی قرار میگیرد . بدین منظور مدلی تهیه گردیده و توسط آن کمپانزه نمودن شبکه‌های توزیع اولیه بمنظور و اهداف مختلف مانند کمپانزه نمودن بمنظور صرفه‌جوئی در تلفات شبکه ، یا کمپانزه نمودن بمنظور صرفه‌جوئی در قدرت یا انرژی و همچنین ترکیبی از اینها را میتوان مورد مطالعه قرار داد . بدین ترتیب ملاحظه میگردد که جهت بهره‌گیری کامل از نصب خازنهای موازی شرایط ویژه‌ای لازم است تا اهداف بطور مشترك و همزمان در نظر گرفته شوند ، مگر در موارد خاص . جهت این بررسی ، آلگوریتمی ارائه گشته و بمنظور بررسی قابلیت روش ارائه شده یك برنامه کامپیوتر ایجاد گردیده و یك مطالعه موردی روی شبکه توزیع شعاعی نه با سه صورت گرفته . در این برنامه استفاده کننده میتواند برحسب هدف مورد نظر خود برنامه را اجراء نماید . در مثال ارائه شده سعی گردیده که منظورها بطور جداگانه اجراء و نتیجه با هم مقایسه گردد .

مقدمه :

نظر به اینکه بخش اعظم تلفات سیستم‌های قدرت در قسمت توزیع صورت میگیرد ، لذا از کمپانزاتورهای خازن موازی در قسمت توزیع استفاده میگردد تا با اصلاح ضریب قدرت بتوان ضمن افزایش ظرفیت تولید و انتقال ، پست های توزیع و تجهیزات جانبی توزیع از تلفات انرژی و افت بیش از حد ولتاژ نیز جلوگیری نمود ، تا بدین ترتیب بتوان سیستم‌های توزیع را با هزینه کمتر و مؤثرتر مورد بهره‌برداری قرار داد . عموما " به دلایل مسائل اقتصادی محل نصب خازن‌های موازی را بجای توزیع ثانویه در توزیع اولیه درنظر میگیرند [۱] ولی تعیین محل نصب خازن‌های موازی و میزان ظرفیت خازن‌های موازی نصب شده در خود قسمت توزیع اولیه مسئله‌ای است که در طی سالهای گذشته توجه متخصصین امر را به خود جلب نموده است. روشهای موجود جهت تعیین محاسن نصب خازن‌ها بستگی به شرایط و سلیقه هر شرکت تولیدکنندهٔ برق داشته و نسبت به هر شرکت یا سازمان تولید کنندهٔ برق فرق مینماید ولی بطور خلاصه این محاسن را میتوان بشرح زیر بیان نمود .

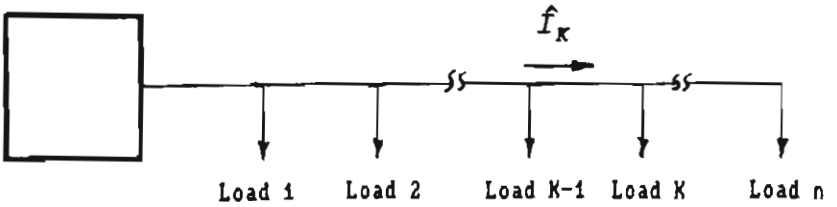
کاهش تلفات انرژی

شکل ۱ یك خط شعاعی n باسه توزیع اولیه را بطور غیر یکنواخت نشان میدهد . جهت نزدیك نمودن مسئله مورد بررسی به سیستم واقعی بارهای خط شعاعی را بطور غیر یکنواخت و فواصل بارها از یکدیگر و نیز نوع هادی هر قسمت را متفاوت در نظرمیگیریم . درحالتی که از کمپانزاتور استفاده نشده باشد شدت جریان هر شاخه را بصورت I_K و مقاومت آنرا r_K در نظر گرفته و فرمول تلفات را بصورت زیر مینویسیم [۲]

$$P_{loss}(K) = 3r_K|I_K|^2 \qquad (۱)$$

اگر شدت جریان شاخه K به مؤلفه‌های اکتیو I_{RK} و مؤلفه‌های راکتیو I_{LK} تجزیه شود خواهیم داشت:

$$P_{loss}(K) = 3r_k[I^2_{RK}+I^2_{LK}] \qquad (۲)$$



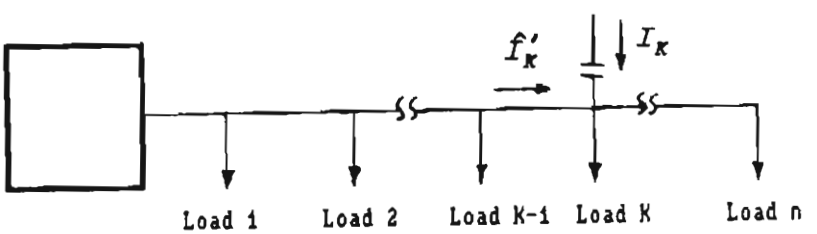
شکل ۱ــ توزیع غیر یکنواخت بار در یك خط شعاعی توزیع اولیه

حال اگر شدت جریان شاخه‌ها را برحسب قدرتهای اکتیو و راکتیو بنویسیم، رابطه بالا به شکل زیر درمی آید ۰

$$P_{loss}(K) = r_K\left[\frac{S^2_{LK}\cos^2\theta_K}{V^2} + \frac{S^2_{LK}\sin^2\theta_K}{V^2}\right] \quad MW \qquad (۳)$$

بعد از نصب خازن در شاخه K خواهیم داشت۰

$$P_{loss}(K) = 3r_k|\hat{I}'| = 3r\left[I^2_{RK} + (I_{LK} - I_K)^2\right] \quad MW \qquad (٤)$$



شکل ۲ــ توزیع غیر یکنواخت بار در یك خط شعاعی توزیع اولیه بعد از نصب خازن

بطوریکه I_K برابر شدت جریان خازن موازی و برابر است با

$$I_k = \frac{Q_{CK}}{V} \qquad (۵)$$

حال اگر رابطه (٤) را بر حسب مقادیر قدرت بنویسیم خواهیم داشت [٣]

$$P_{loss}(K) = r_K\left[\frac{S^2_{LK}\cos^2\theta_K}{V^2} + \left(\frac{S_{LK}\sin\theta_K}{V} - \frac{Q_{CK}}{V}\right)^2\right] \qquad (٦)$$

از تفاضل دو رابطه (٣) و (٦) میزان صرفه‌جوئی در تلفات بشرح زیر بدست می آید ٠

$$\Delta P_{loss}(K) = \frac{r_K Q_{CK}(2S_{LK}\sin\theta - Q_{CK})}{V^2} \quad KW \qquad (٧)$$

حال اگر پارامترهای زیر را بشرح زیر تعریف کنیم

L_f = ضریب بار شدت جریان راکتیو

T = تداوم سیکل بار (مثلا " ٨٧٦٠ ساعت)

Q_{CK} = توان راکتیو سه‌فاز خازن کمپانزاتور موازی برحسب Mvar در شاخه K

r_K = کل مقاومت شاخه Kام نسبت به مرکز بار مربوطه

S_{LK} = بار سه فاز کمپانزه نشده برحسب MVA

θ = زاویه بار بدون اصلاح شده

V = ولتاژ خط به خط بر حسب KV

K_1 = هزینه انرژی بر حسب \$/KWh

صرفه جوئی در هزینه انرژی در هر شاخه بصورت زیر خواهد بود ٠

$$\Delta P_{LOSS,\$}(K) = \frac{8760 K_1 r_K Q_{CK}(2L_f S_{LK}\sin\theta - Q_{CK})}{V^2} \quad \$ \qquad (٨)$$

ظرفیت آزاد شدهٔ تجهیزات

ظرفیت آزاد شدهٔ ژنراتور در اثر نصب خازن را میتوان از رابطه زیر محاسبه نمود

$$\Delta S_G = S_{GK} - \sqrt{S^2_{GK} + Q^2_{CK} - 2S_{GK}Q_{CK}\sin\theta} \qquad (٩)$$

که در آن S_{GK} ظرفیت تولید شده بر حسب MVA ، Q_{GK} مقدار قدرت راکتیو خازنی کمپانزاتور برحسب Mvar و $\cos\theta$ برابر ضریب قدرت قبل از اعمال نمودن خازن میباشند.
حال اگر C_G هزینه سالانه تامین پیك بار بر حسب $(\$/KW)_{/yr}$ باشد ، کل صرفه‌جوئی سالانه در اثر آزاد شدن ظرفیت ژانراتور تولید شده در هر شاخه بصورت زیرخواهد بود .

$$\Delta S_{G,\$}(K) = \Delta S_G X C_G \qquad (10)$$

به همین طریق صرفه‌جوئی در ظرفیت آزاد شده خط را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$\Delta S_T = S_{TK} - \sqrt{S^2_{TK} + Q^2_{CK} - 2S_{TK}Q_{CK}\sin\theta} \qquad (11)$$

باز اگر C_T برابر هزینه سالانه خط انتقال و تجهیزات جانبی برحسب $(\$/MVA)_{/yr}$ باشد مقدار صرفه‌جوئی در هزینه در اثر آزاد شدن ظرفیت خط در هر شاخه بصورت زیر خواهد بود .

$$\Delta S_{T,\$}(K) = \Delta S_T . C_T \qquad (12)$$

و بالاخره مقدار قدرت صرفه‌جوئی شده در اثر آزاد شدن پست توزیع به لحاظ نصب خازن بصورت زیر نوشته میشود .

$$\Delta S_S = S_{SK} - \sqrt{S^2_{SK} + Q^2_C - 2S_{SK}Q_C \sin\theta} \qquad (13)$$

و با در نظر گرفتن هزینه سالانه پست توزیع و تجهیزات جانبی بصورت C_S برحسب $(\$/MVA)/yr$ ، خواهیم داشت:

$$\Delta S_{S,\$}(S) = \Delta S_S . C_S \qquad (14)$$

با در نظر گرفتن کلیه محاسن بدست آمده میتوان نوشت:

$$\Delta S_a(K) = \Delta S_{G,\$}(K) + \Delta S_{T,\$}(K) + \Delta S_{S,\$}(K) + \Delta P_{L,\$}(K) \qquad (15)$$

حال اگر هزینه مجموعه خازنها در هر شاخه ، نسبت مستقیم با شدت جریان در باس K داشته باشد خواهیم داشت:

$$E_K(i_K) = A_1 i_K + A_0 \qquad (16)$$

بطوریکه i_K برابر $I_K - I_{K-1}$ میباشد . معادله بالا را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$E_K(I_{K-1}, I_K) = A_1 (I_K - I_{K-1}) + A_0 \qquad (17)$$

بطوریکه مقادیر A_1 و A_0 ثابت هستند .

معادله هدف برای این بهینه‌سازی به حداکثر رساندن صرفه‌جوئی خالص‌سالانه در نتیجه کاهش‌تلفات با در نظر گرفتن هزینه نصب خازن‌ها در سیستم میباشد . لـــــذا معادله هدف را میتوان بصورت زیر نوشت [٤]

$$C_n = \sum_{K=1}^{n} (\Delta S_{aK} - E_K) \qquad (18)$$

مجدودیت لازم برای این مسئله این است که قدرت راکتیو خازنی تامین شده در باس K ام این مجموعه خازن‌ها حداقل برابر کل قدرت راکتیو جاری از باس K گـردد، یعنی : $Q_{CK} \geq Q_{K-1}$ (19)

بعد از K مرحله، مقدار قدرت راکتیو بستگی به این مرحله و مراحل قبلی دارد ، لذا اکل معادله برگشتی بصورت زیر خواهد بود .

$$C = C_K + \sum_{j=K+1}^{n} (\Delta S_{aj} - E_j) \qquad (20)$$

مناسبترین روش‌حل این مسئله بـــهنیه سازی،استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی پسرواست. به لحاظ محدود بودن صفحات این مقاله به توضیح بیشتر آن پرداخته نمیشود بـــرای توضیحات بیشتر آن میتوان به مرجع [٥] مراجعه نمود .

مثال عددی ــ یك خط توزیع شعاعی 230 KV غیر یکنواخت در نظر گرفته که دارای نه باس‌بوده که هر قسمت از خط بوسیلهٔ کابل‌های متفاوت طبق جدول یك بهم متصـــــل هستند . در جدول ١ همچنین مشخصات خطوط و بار راکتیو داده شده است .خروجی کامپیوتر برای سه حالت مختلف بهره‌برداری در جدول ٢ نشان داده شده است.بـــــه طوریکه مشاهده میشود اندازه و محل خازن‌ها در این سیستم توزیع شعاعی برای هر یك

جدول ۱۰ مشخصات خط توزیع شعاعی نه باسه

قسمت خط	مقاومت در هر کیلومتر	طول خط برحسب کیلومتر	قدرت راکتیو بار در هر قسمت بر حسب کیلو وار
۱	۰/۱۲۱۶	۰/۳۹۱	۴۶۰
۲	۰/۱۷۴۲	۰/۵۴۷	۳۴۰
۳	۰/۲۷۲۸	۱/۰۵۶	۴۴۶
۴	۰/۵۳۵۷	۰/۵۰۳	۱۸۴۰
۵	۰/۵۳۵۷	۱/۴۲۹	۶۰۰
۶	۰/۵۳۵۷	۰/۶۵۲	۱۱۰
۷	۰/۸۵۱۳	۰/۹۳۲	۶۰
۸	۰/۸۵۱۳	۲/۱۷۴	۱۳۰
۹	۰/۸۵۱۳	۲/۴۲۳	۲۰۰

جدول ۲ ـ محل و مقدار بهینه خازن‌موازی در خط توزیع شعاعی

محل	مقدار خازن برحسب کیلو وار		
	حالت اول ـ صرفه‌جوئی در تلفات خط	حالت دوم ـ افزایش قابلیت انتقال	حالت سوم ـ صرفه‌جوئی در تلفات وافزایش قابلیت انتقال
۱	۴۶۰	۰/۰	۴۶۰
۲	۰/۰	۴۶۰	۰/۰
۳	۴۶۰	۰/۰	۴۶۰
۴	۹۲۰	۹۲۰	۹۲۰
۵	۹۲۰	۴۶۰	۹۲۰
۶	۹۲۰	۰/۰	۰/۰
۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰
۸	۰/۰	۰/۰	۰/۰
۹	۴۶۰	۰/۰	۴۶۰
صرفه‌جوئی خالص	$۶/۱۰ \times ۱۰^{۵}$	$۱/۵۴ \times ۱۰^{۵}$	$۶/۸۸۶ \times ۱۰^{۵}$

از سه حالت مورد بررسی نیز داده شده است . همانطوریکه انتظار میرفت حالت سوم یعنی حالتی که هر دوی تلفات سیستم و صرفه‌جوئی در ظرفیت انتقالی خطوط و تجهیزات جانبی سبب بیشترین صرفه‌جوئی کل سیستم میگردد .

نتیجه گیری :

روش ارائه شده در این مقاله تعیین مقدار بهینه و محل کمپانزاتورهای خازنی را در یك سیستم توزیع شعاعی را نشان میدهد . بدین منظور ابتدا مسئله بصورت مدل ریاضی درآمده و سپس توسط برنامه‌ریزی دینامیکی پسرو حل گردیده و نتایج کامپیوتری بدست آمده در جدول ۲ ارائه گشته . در این مطالعه سه حالت مختلف بهره‌برداری سیستم توزیع مورد بررسی قرار میگیرد . بطوریکه در حالت اول اندازه و محل کمپانزاتورهای خازنی با هدف کمیته نمودن تلفات شبکه و هزینه نصب خازن مورد مطالعه قرار میگیرد و سپس در حالت دوم اندازه و محل خازن‌های سیستم توزیع با هدف صرفه‌جوئی در ظرفیت خطوط و تجهیزات جانبی حل گردیده و سپس در حالت سوم دو هدف مورد نظر در حالتهای اول و دوم بطور مشترك در نظر گرفته میشود . بطوریکه از نتایج کامپیوتری میتوان نتیجه گرفت حالت سوم دارای حداکثر صرفه‌جوئی در بهره‌برداری از سیستمهای توزیع میباشد .

مراجع :

[1]. James Barton Young, Optimal Static Capacitor Allocation by Discrete Programming : Development of Theory, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-89, No. 7, Sept./Oct., 1990, pp. 1499-1503.

[2]. Mesut E. Boron and Felix F. Wu, Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January, 1989. pp. 735-743.

[3]. Turan Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill Book Company, 1986.

[4]. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, 1989.

[5]. Kaufman, A. Graphs, Dynamic Programming and Finite Games, Academic Pres, New York, 1967.