

مقارنة مفايد الاستطاعة وهبوط التوتر لخط نقل في الشبكة السورية لدى استخدام خط نقل تيار متناوب عالي التوتر وخط نقل تيار مستمر عالي التوتر (1)

د. لجين غيبور⁽²⁾

الملخص

في هذا البحث أُعيد حساب قيم مقاومة، وممانعة، والسعة التسريبيه لخط نقل حزمي مزدوج $n=2$ ، بالتيار المتناوب عالي التوتر $400kV$ ، قائم في الشبكة السورية يربط بين محطة تحويل حماه ومحطة تحويل حلب. وقُرِئَت بالقيم الواردة في بيانات وزارة الكهرباء. بناءً على هذه البيانات مُثِّلَ خط النقل بالتوتر العالي المتناوب باستخدام برنامج NEPLAN واستُنْتُجَتِ المفايد وهبوطات التوتر عند استطاعة نقل محددة، بالمقابل وعند الاستطاعة نفسها اعتمدَ خط نقل بالتيار المستمر عالي التوتر $500kV$ ، لنقل الاستطاعة نفسها واعتماد محددات الخط المتناوب نفسها، نتيجةً لذلك تم الحصول على المفايد والهبوطات والسماح بإجراء مقارنة واقعية وبيان ميزة استخدام شبكات النقل بالتيار المستمر عالي التوتر للمسافات المتوسطة $150km$ ، والتأكيد بزيادة استقرار توترات قضبان التوزيع، وعمل مجموعات التوليد والتحويل، والتحكم بقيمة الاستطاعة المنقولة على خط النقل بدقة، دون أن تتأثر توترات قضبان التوزيع في محطات الإرسال والاستقبال بتغيرات التردد والتوتر والاستطاعة المنقولة.

الكلمات المفتاحية: محددات خط النقل، الضياعات في خطوط النقل، النقل بالتيار المستمر عالي التوتر، مقاومة خط النقل، مفاعلة خط النقل، سعة خط النقل، تمثيل خطوط النقل.

(1) أعد البحث في قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

(2) قائم بالأعمال في قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

Power Losses and Voltage Drop Compression for a Transmission Line in Syrian Network in Case of Using HVAC or HVDC Transmission Lines⁽¹⁾

Dr. Lujayn Ghaibour⁽²⁾

Abstract

The value of the resistance, impedance and capacitance of a double circuit high voltage AC transmission line 400kV, have been recalculated. This line normally connecting Hama 400kV substation to Aleppo 400kV substation. A comparison was done between these values and the values presented by the ministry of Electricity in Syria. Based on this data, a simulation has been done of the high voltage AC transmission line using NEPLAN program, then the Losses and the voltage drops along the line have been deduced. On the other hand, using the same values of the transmitted power and line parameters are used for a high voltage direct current HVDC transmission line working at 500kV. As a result the power losses and voltage drops have been obtained again, which permits us to do a realistic comparison between AC and DC transmission lines, since the power losses and the voltage drops are less in the HVDC system, which gives us the advantages to use HVDC transmission lines instead of AC lines in future. From the obtained results we notes that the HVDC system increases the stability of the busbars voltages and the stability of generation stations and substations, and gives the ability to control the transmitted power, without effecting the changes happened in frequency and busbars voltages.

Key words: transmission line parameters, transmission lines losses, HVDC transmission line, transmission line resistance, transmission line impedance, transmission line capacitor, transmission lines simulation.

⁽¹⁾The paper has been realized at electrical power engineering department- Faculty of mechanical and electrical engineering, Damascus University.

⁽²⁾Electrical power engineering department, Faculty of mechanical and electrical engineering- Damascus University.

1- مقدمة

فضلاً عن الضياعات، يعدُّ هبوط التوتر على عناصر نظام نقل القدرة العامل الثاني الأكثر تأثيراً إذ يجب ألا يتجاوز هذا الهبوط قيمةً محددة، تضبطها المعايير العالمية لكل سوية توتر. ويتعلق هبوط التوتر بقيمة مقاومة خط النقل، وقيمة المفاعلة التحريضية X_L ، التي تسهم في الجزء الأكبر منه.

في هذا البحث دُرِسَتِ الضياعات الكهربائية في خط نقل تيار متناوب عالي التوتر HVAC وخط نقل تيار مستمر عالي التوتر HVDC، وفُورِنَتِ الضياعات الناتجة وهبوط التوتر في حال إضافة معوضات استطاعة ردية وعدم إضافتها، وذلك لدى استخدام خط نقل توتر متناوب 400kV، لمسافة 153km، باستطاعة نقل 465MW، ومقارنته بخط نقل بالتيار المستمر توتره 500kVDC باستطاعة مماثلة تعادل 465MW؛ وذلك للوصول إلى نتيجة عملية تبرهن جدوى استخدام أنظمة النقل بالتيار المستمر عالي التوتر HVDC، عبر مقارنة المفاوید وهبوط التوتر في كلا النظامين.

اختير خط النقل المتناوب من الشبكة السورية، وهو يربط بين باسبار حماه 2 وباسبار حلب بطول 153km، وهو أطول خطوط شبكة 400kV في الشبكة السورية.

2- محددات خط نقل القدرة الكهربائية

[10][4][3][2]

تُمثِّلُ خطوط نقل القدرة بدارة π باستخدام المعادلات الناظمة لهذه الخطوط تبعاً لطول الخط. كما يظهر في الشكل (2). ومن ثَمَّ لنمذجة خط النقل يجب وضع المحددات الأساسية له، وهي: المقاومة الأومية R ، والمحاوضة L ، وسعة الخط C .

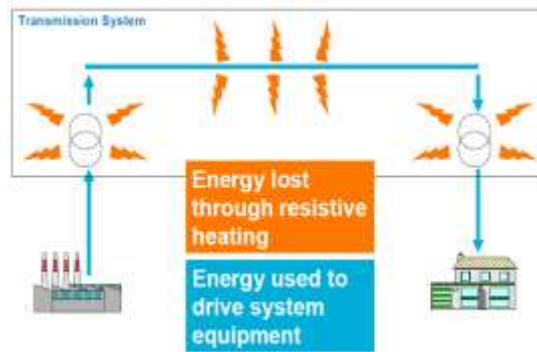
من أجل ذلك أُخِذَتِ محددات الخط المراد دراسته المدرجة في الجدول (1) من البيانات المقدمة من وزارة الكهرباء السورية، وحُسِبَتِ المقاومة الأومية والمفاعلة التحريضية والسعوية لهذا الخط باستخدام العلاقات

تحدثت الضياعات الكهربائية في نظم القدرة الكهربائية نتيجة الطبيعة الفيزيائية لخطوط النقل والتجهيزات المكونة للنظام، ولاسيما المقاومة الأومية لهذه الخطوط والتجهيزات. كما نعلم يوجد نوعان من الضياعات في أنظمة النقل الضياعات الثابتة والضياعات المتغيرة.

تحدثت الضياعات الثابتة في القلب الحديدي للمحولات، والأممراس الكهربائية، ولا تعتمد قيمة هذه الضياعات على التيار المار في الناقل إِمَّا تعتمد على الحقل الكهربائي الناتج عن التوتر المطبق، والتيار المتعرض في القلب الحديدي. ونظراً إلى أنَّ التوتر يُعدُّ ثابتاً نسبياً فإنَّ قيمة هذه الضياعات ثابتة.

بالمقابل تختلف قيمة الضياعات المتغيرة مع تغير قيمة التيار المار في النواقل والمحولات، وتعتمد على درجة تسخين المقاومة الأومية لهذه التجهيزات.

تعطى الضياعات المتغيرة في خط نقل بالتوتر المتناوب بالعلاقة I^2R . إذ I هو القيمة الفعالة للتيار و R مقاومة الناقل. وتُسَرَّبُ هذه الضياعات بالإشعاع إلى الوسط المحيط. ويظهر ذلك في الشكل (1).



الشكل (1) الضياعات في نظام القدرة

تمثل الضياعات الكلية في نظام نقل القدرة الكهربائية بالفرق بين الطاقة المقدمة من التوليد، والطاقة المستهلكة في الأحمال.

د. لجين غيبور. مقارنة مفايد الاستطاعة وهبوط التوتر لخط نقل في الشبكة السورية لدى استخدام خط نقل تيار متناوب عالي التوتر وخط نقل تيار.....

الشكل (4) الأبعاد الدقيقة لبرج التوتر العالي

من الشكل (4) استنتجنا قيم الأبعاد بين النواقل لخط نقل حزمي مزدوج n=2 والأطوار الثلاثة، والجدول (2) يبين هذه الأبعاد.

الجدول (2) الأبعاد بين النواقل على برج التوتر العالي

| | |
|-----------------|--------|
| AA'=BB'=CC' | 0.4m |
| AB=A'B'=BC B'C' | 10.63m |
| AB'=BC' | 11.0m |
| BA'=B'C | 10.25m |
| AC= A'C' | 20m |
| A'C | 19.6m |
| AC' | 20.4m |

3- حساب قيمة المفاعلة التحريضية لخط

400kv حزمي مزدوج n=2

قيمة المحارضة الكلية لخط نقل هي مجموع المحارضة الذاتية لخط النقل، والمحارضة المتبادلة مع النواقل المجاورة - يمكن أخذ العلاقات التي تعطي المحارضة الكلية لخط النقل من المرجع [2]- تتعلق المحارضة الذاتية للخط بطبيعة المادة المصنوع منها الناقل (قيمة النفاذية المغناطيسية لمادة الناقل) وقطر الناقل. إذ يعطى التدفق المغناطيسي الذاتي ضمن الناقل A بالعلاقة:

$$(N\phi)_1 = \mu_0\mu_r \frac{I_a}{8\pi} \dots\dots\dots(1)$$

بأخذ $\mu_r = 1$ ، يحدد التدفق المغناطيسي الخارجي للناقل بافتراض عدم وجود أي نواقل مجاورة تحمل تياراً كهربائياً، ومنه نظرياً يصل التدفق الخارجي external flux إلى اللانهاية، بالمكاملة بدءاً من نصف قطر الناقل إلى اللانهاية تصبح كثافة الحقل عند نقطة تبعد مسافة x عن الناقل:

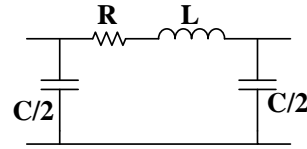
$$H_x = \frac{I_a}{2\pi.x} \dots\dots\dots(2)$$

$$\Rightarrow B_x = \mu_0.H_x = \mu_0 \frac{I_a}{2\pi.x} \dots\dots\dots(3)$$

الرياضية، وقُورِبت القيم النظرية بالقيم العملية المقدمة من بيانات الوزارة. بناءً على هذه القيم مُنلَّ نظام النقل بالتيار المستمر وبالتيار المتناوب في برنامج NEPLAN.

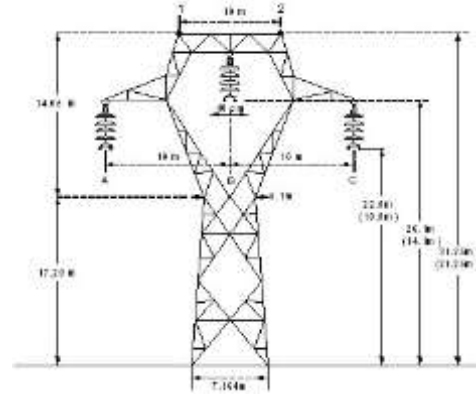
الجدول (1) محددات خط النقل حماه2- حلب

| NAME OF LINE | HAMA 2- Aleppo F |
|--------------|-----------------------|
| U BASE | 400 [kV] |
| LENGTH | 153 [km] |
| R | 18.2835 [Ω] |
| XL | 106.4268 [Ω] |
| XC | 392.598 [Ω] |
| TYPE | ACSR |
| SEC | 2(550/70) [mm2] |
| IMAX | 1640 [A] |

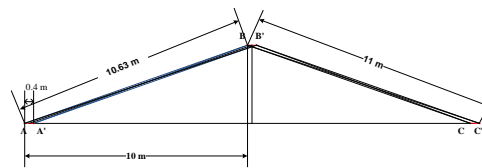


الشكل (2) مخطط دائرة π لمثيل خطوط النقل المتوسطة الطول

يبين الشكل (3) الأبعاد الأساسية لبرج التوتر العالي 400kv لخط نقل حزمي مزدوج n=2. باعتماد هذا النموذج للأبراج حُدِّدت القياسات الدقيقة للأبعاد بين النواقل على البرج، كما يبيِّن الشكل (4).

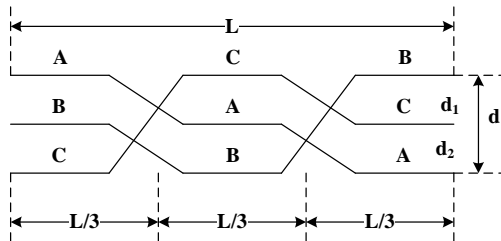


الشكل (3) برج 400kv خط حزمي n=2 [1]



$$L_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{d}{r}\right) \right) \dots\dots\dots(11)$$

$$: d = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}$$



الشكل (5) تبادل مواقع أطوار خط النقل .

بأخذ خط نقل حزمي مزدوج n=2، يمكن حساب المحارضة الكلية لخط النقل، بإدخال معامل النفوذية المغناطيسي μ_r لمادة الناقل في العلاقة أعلاه، وإدخال تأثير التحريض المتبادل مع نواقل الدارة الثانية، عندئذٍ تعطى المحارضة الكلية بالعلاقة الآتية:

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln\left(\frac{D}{r}\right) \right) \dots\dots\dots(12)$$

مع اعتبار تبادل الأطوار على طول خط النقل، يمكن حساب الثابت D من العلاقة:

$$D = \sqrt[3]{\frac{(AB)(AC)(BC)(A'B')(A'C')(B'C')}{(AA')(BB')(CC')}} \dots\dots\dots(13)$$

بتعويض أبعاد الخط من الجدول (2) يمكن حساب

الثابت D للخط المدروس:

$$D = \sqrt[3]{\frac{10.63 * 20 * 10.63 * 11 * 11 * 20.4}{(0.4)^3}}$$

$$D = 443.381$$

يعطى معامل النفاذية المغناطيسية النسبي للألمنيوم

$$\mu_r = 1.0022$$

من بيانات المؤسسة العامة لنقل الكهرباء وتوزيعها لدينا

مقطع الناقل $A = 550/70mm^2$ ومن ثمَّ فإنَّ نصف

$$r = 14.048mm$$

بتطبيق العلاقة السابقة (12) يمكن حساب محارضة

خط النقل:

$$\Rightarrow d\phi_2 = \mu_0 \frac{I_a}{2\pi \cdot x} dx \dots\dots\dots(4)$$

$$\Rightarrow \phi_2 = \int_r^{\infty} \mu_0 \frac{I_a}{2\pi \cdot x} dx$$

$$\phi_2 = \mu_0 \frac{I_a}{2\pi} [\ln(\infty) - \ln(r)] \dots\dots\dots(5)$$

بحسب التدفق المغناطيسي لكل متر من الناقل إذ عدد

اللفات N=1 بالعلاقة:

$$N\phi_2 = \mu_0 \frac{I_a}{2\pi} [\ln(\infty) - \ln(r)] \dots\dots\dots(6)$$

بوجود دارة ثلاثية الطور (a,b,c)، يمكن حساب التدفق

المغناطيس المتبادل بشكل مشابه للحساب السابق.

التدفق المتبادل للناقل a مع ناقل مجاور b يبعد بمقدار d_1

يعطى بالعلاقة:

$$(N\phi_3) = \frac{I_b \cdot \mu_0}{2\pi} [\ln(\infty) - \ln(d_1)] \dots\dots\dots(7)$$

وكذلك التدفق المتبادل مع الناقل c يعطى بالعلاقة الذي

يبعد بمقدار d_2 :

$$(N\phi_4) = \frac{I_c \cdot \mu_0}{2\pi} [\ln(\infty) - \ln(d_2)] \dots\dots\dots(8)$$

ومنه بجمع المعادلات (1) و(6) و(7) و(8)

$$(N\phi)_A = (N\phi)_1 + (N\phi)_2 + (N\phi)_3 + (N\phi)_4$$

$$(N\phi)_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ I_a \left[\frac{1}{4} - \ln(r) \right] - I_b \ln(d_1) - I_c \ln(d_2) \right\}$$

$$\dots\dots\dots(9)$$

تعطى محارضة الناقل a بالعلاقة:

$$L_A = \frac{(N\phi)_A}{I_a} \dots\dots\dots(10)$$

بشكل مماثل يمكن حساب محارضة الخطين b و c وبأخذ

تبادل الأطوار بالحسبان، كما في الشكل (5)، فإنَّ

المسافات بين النواقل تتغير لتحقيق المساواة بين التحريض

المتبادل فيما بينها، ومن ثمَّ يمكن اختصار العلاقة السابقة

لتصبح:

وبأخذ تأثير السعة الأرضية بالحسبان تصبح العلاقة:

$$C_0 = \frac{2\pi k_0}{\ln \frac{D}{r} \left(\frac{2h}{\sqrt{4h^2 + D^2}} \right)} \dots\dots\dots(15)$$

بتطبيق هذه العلاقة حسب أبعاد الناقل المدروس والمسافة بين الخطوط وارتفاع الناقل عن الأرض ينتج:

$$C_0 = \frac{2\pi \times 8.854187816 \times 10^{-12}}{\ln \left(\frac{446.2604}{0.014048} \right) \left(\frac{2 \times 10.5}{\sqrt{4 \times 10.5^2 + 446.2604^2 \times 10^{-6}}} \right)}$$

$$C_0 = 5.3655 \times 10^{-12} [F/m] = 5.3655 \times 10^{-9} [F/km]$$

ومنه يمكن حساب السماحية B والممانعة السعوية لخط النقل:

$$B = 1685.63 \times 10^{-9} [S/km] \Rightarrow X_C = 593250 [\Omega/km]$$

$$B_{total} = 257.9 \times 10^{-6} [S] \Rightarrow X_{Ctotal} = 3877.45 [\Omega]$$

نلاحظ وجود اختلاف عن القيمة المعطاة في الجدول (2)، لكن هذه القيمة توافق المعايير العالمية [3][4] التي تعطي قيمة الممانعة السعوية لخط نقل دارة 400kV عند التردد 60Hz بالقيمة 3000000[Ω/km].

5- حساب المقاومة الأومية

تتعلق المقاومة الأومية لأي ناقل بالناقلية الكهربائية لمعدن الناقل ومقطعه وطوله. وفق العلاقة

$$R = \frac{\rho l}{A} \text{ إذ } \rho \dots\dots\dots(16)$$

المقاومة النوعية لمعدن الناقل، وتساوي من أجل الألمنيوم $\rho = 2.655 \times 10^{-8} [\Omega.m]$ عند درجة حرارة الصفر المئوي [2].

عامل التصحيح عند درجة حرارة المحيط الخارجي 25°:

$$\rho_1 = \rho_0 (1 + \alpha_0 (t_1 - 0)) \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{إذ } \rho_1 = 2.655 \times 10^{-8} (1 + 0.00434(25)) = 2.9430675 \times 10^{-8} [\Omega.m]$$

عامل المقاومة النوعية عند درجة الحرارة النظامية

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \left(\frac{D}{r} \right) \right) =$$

$$L_0 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left(\frac{1.0022}{4} + \ln \frac{443.381}{0.014048} \right)$$

$$L_0 = 21.2205 \times 10^{-7} [H] = 2.12205 [\mu H/m]$$

ومنه المفاعلة التحريضية للخط

$$X_L = \omega L_0 = 314 * 21.2205 \times 10^{-7}$$

$$X_L = 0.6663 \times 10^{-3} [\Omega/m] = 0.6663 [\Omega/km]$$

هذه القيمة متوافقة مع المعايير العالمية التي تعطي المفاعلة التحريضية لخط نقل مفرد عند سوية 400kV وتردد 60Hz بالقيمة $X_L = 0.3 [\Omega/km]$ [3][4].

من أجل خط النقل المدروس تصبح المفاعلة

التحريضية لكامل الخط

$$X_L = 0.6663 [\Omega/km]$$

$$X_{Line} = 0.6663 * 153 = 101.94 [\Omega]$$

بمقارنة هذه القيمة بالبيانات المقدمة من المؤسسة العامة لنقل الطاقة الكهربائية وتوزيعها، نلاحظ تقارب القيمة من القيمة المعطاة في بيانات الخط .

$$X_{Line} = 106.4268 [\Omega]$$

4- حساب قيمة سعوية خط النقل المتناوب

400kV

تتعلق سعة خط النقل بطبيعة المادة المصنوع منها الناقل، وبالأبعاد الذاتية للناقل، والأبعاد بين النواقل. وتعطى علاقة حساب سعة خط نقل التوتر العالي المضاعف في المرجع [2] بالعلاقة:

$$C_0 = \frac{2\pi k_0}{\ln \frac{D}{r}} \dots\dots\dots(14)$$

إذ D: الثابت الذي حُسبَ في الفقرة السابقة، و r نصف قطر الناقل و k_0 ثابت السعة التسريبية للألمنيوم وتساوي قيمتها في المرجع المعتمدة :

$$k_0 = 8.854187816 \times 10^{-12} [F]$$

ملاحظة: لحساب مقاومة الخط المستمر المكافئ لا نأخذ الظاهرة القشرية بالحسبان ومن ثمَّ المقاومة الأومية للخط المستمر:

$$R_{DC} = 0.05351032 \times 2 = 0.10702[\Omega/km]$$

6- نمذجة نظام النقل

1-6 التعريف ببرنامج NEPLAN[6]

بدأ استخدام برنامج NEPLAN عام 1988، وتم تطويره وتحديثه ليصبح بيئة برمجية ذات جودة عالية في نمذجة الشبكات الكهربائية والغازية والمائية وشبكات التدفئة وتمثيلها. باستخدام واجهات تخاطب واضحة تسمح للمستخدم بتمثيل عناصر الشبكات بشكل فعال. إذ يسمح بإجراء عمليات جريان الحمولة في الشبكات الكهربائية وتمثيل حالات الأعطال بدقة وبسرعة. كما يسمح بإجراء تعديلات على عناصر الشبكات الكهربائية وتعديلها للحصول على الحالة المثلى.

2-6 تمثيل خط النقل

باعتتماد المحددات المحسوبة أعلاه لخط النقل وبأخذ خط 400kV حماه 2- حلب بطول 153km، كنموذج للدراسة مثلاً هذا الخط في برنامج NEPLAN، إذ مثلاً محطة توليد (مجردة) في حماه مع محطات التحويل والباسبارات المجاورة لها، ومحطة التوليد الحرارية في حلب مع محطات التحويل والباسبارات وخطوط النقل والأحمال المجاورة لها. وشُعَل الخط لينقل طاقة كهربائية بحدود 470MW من باسبار حماه 2 إلى باسبار حلب 400kV. يبيّن الشكل (6) مخطط التمثيل المعتمد.

أُجريت اختبارات عدّة لنقل الطاقة الكهربائية على خط النقل دون تعويض للاستطاعة الردية ثم مع تعويض على أحد جانبي الخط، ثم مع تعويض للاستطاعة الردية على جانبي الخط

بتطبيق العلاقة (16) يمكن حساب المقاومة الأومية للخط المدروس بتعويض قيمة ρ_1 :

$$R = \frac{\rho_1 l}{A} = \frac{2.9430675 \times 10^{-8} * 1000}{550 * 10^{-6}}$$

$$R = 0.05351032[\Omega/km]$$

بأخذ الظاهرة القشرية بالحسبان:

$$R_S = R \frac{\left(1 + \frac{m^2}{48}\right)^{1/2} + 1}{2} \quad \text{for } m = 0 \div 0.3 \dots \dots (18)$$

$$R_S = R \left(\frac{m}{2\sqrt{2}} = 0.26\right) \quad \text{for } m > 0.3 \dots \dots (19)$$

إذ تعطى m وفق إحدى العلاقتين

$$m = 0.3\sqrt{f.A} \dots \dots (20)$$

$$= 0.3\sqrt{50 * (550 + 70)10^{-6}} = 0.053$$

$$m = \sqrt{\frac{8\pi f.l.10^{-9}}{R}} \dots \dots (21)$$

$$= \sqrt{\frac{8\pi.50.1000.10^{-9}}{0.05351032}} = 0.15324$$

بالتعويض في العلاقة (18) إذ $m < 0.3$:

$$R_S = R \frac{\left(1 + \frac{m^2}{48}\right)^{1/2} + 1}{2} = 0.0535169[\Omega/km]$$

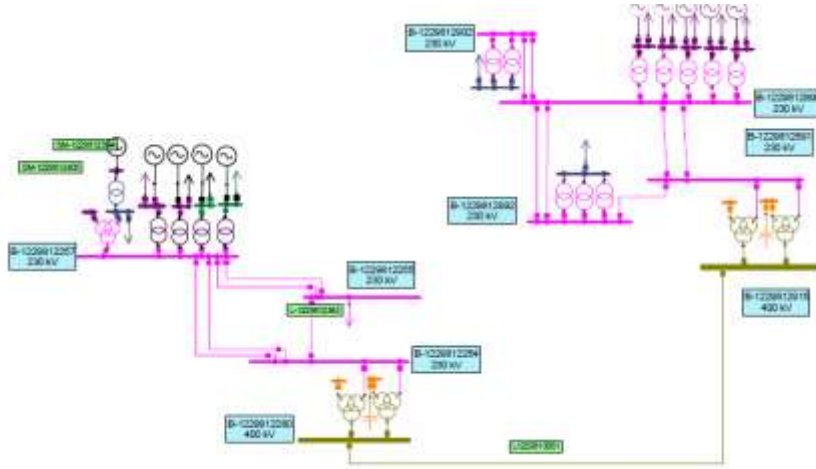
بمكافئة خط النقل الحزمي المزدوج المكون من ناقلين تكون قيمة المقاومة لخط النقل المدروس:

$$R_S = 0.107034[\Omega/km]$$

$$R_{total} = 0.107034 * 153 = 16.376[\Omega]$$

القيمة الواردة في بيانات المؤسسة 18.2835Ω وهي متقاربة مع القيمة المحسوبة، وهي موافقة للمعايير المدرجة في المرجع [4][3] التي تحدد قيمة المقاومة $0.03\Omega/km$ لخط مفرد.

د. لجين غيبور. مقارنة مفايد الاستطاعة وهبوط التوتر لخط نقل في الشبكة السورية لدى استخدام خط نقل تيار متناوب عالي التوتر وخط نقل تيار.....



الشكل (6) مخطط تمثيل نظام نقل القدرة في برنامج NEPLAN (الملحق A)

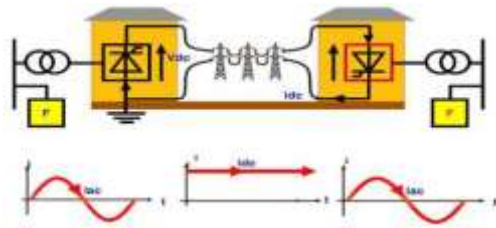
الجدول (3) نتائج تمثيل خط النقل المتناوب مع حالات تعويض الاستطاعة الردية

| تعويض الاستطاعة الردية في جهتي الإرسال والاستقبال 14MVAR | تعويض الاستطاعة الردية في جهة الاستقبال 108MVAR | تعويض الاستطاعة الردية في جهة الإرسال 22MVAR | دون تعويض للاستطاعة الردية | |
|--|---|--|-------------------------------|-----------|
| 100∠45.8 | 103.79∠44.3 | 100∠45.9 | 93.04∠49.2 | VS % |
| 95.88∠36.9 | 100∠36.1 | 95.6∠37 | 89.71∠39 | Vr % |
| 16.48 | 15.16 | 17.6 | 13.36 | ΔV [kV] |
| 0.69 | 0.666 | 0.693 | 0.741 | I [kA] |
| 477.148 | 477.419 | 477.148 | 476.58 | PS [MW] |
| 47.23 | 35.522 | 59.192 | 26.797 | QS [MVAR] |
| 465.096 | 466.286 | 465.015 | 464.043 | Pr [MW] |
| 51.416 | 51.96 | 55.725 | 11.107 | Qr [MVAR] |
| 12.052 | 11.133 | 12.133 | 13.537 | ΔP [MW] |
| -4.187 | -16.438 | +3.467 | 15.69 | ΔQ [MVAR] |

عن طريق تغيير زوايا القدح بين الجسور إذ يعطى التيار المستمر بالعلاقة [5][7][8][9]

$$I_d = \frac{E_S - E_R}{R_{DC}} \dots\dots\dots(22)$$

إذ E_S التوتر المستمر على خرج محطة الإرسال و E_R التوتر المستمر على دخل محط الاستقبال و R_{DC} المقاومة الأومية لخط النقل المستمر، ومن ثمّ يمكن التحكم بقيمة الاستطاعة المنقولة على خط النقل من خلال التحكم بقيمة التوتر المستمر في الإرسال والاستقبال، عن طريق تغيير زوايا القدح للمبدلات الالكترونية. يبيّن الشكل (7) مخططاً بسيطاً لنظام خط النقل بالتيار المستمر HVDC.



الشكل (7) مخطط نظام النقل بالتيار المستمر عالي التوتر [7]

يبيّن الشكل (8) تمثيل نظام خط نقل بالتيار المستمر عالي التوتر في برنامج NEPLAN، توتر العمل 500kV، الاستطاعة المنقولة يمكن تحديدها عن طريق محطة الإرسال (المقوم)، وأخذت 465MW (مساوية للاستطاعة المنقولة بالتيار المتناوب)، في حين حُدّد توتر العمل 500kV عن طريق محطة الاستقبال. يبيّن الشكل (9) نتائج التمثيل، ويبين الجدول (4) القيم العددية لنتائج التمثيل.

من ثمّ استُبدِلَ بالخط المتناوب خط نقل بالتيار المستمر وقُورِنَتِ الضياعات وهبوط التوتر في الحالات السابقة جميعها.

يبين الجدول (3) نتائج تمثيل الشبكة المدروسة بالتيار المتناوب عالي التوتر 400kV، إذ أُحْصِنَتْ نتائج التمثيل بدايةً دون إضافة أي استطاعة ردية، ثم أُضِيفَت استطاعة ردية في جهة الإرسال فقط، ثم من جهة الاستقبال، ثم من جهتي الإرسال والاستقبال معاً. وفي كل حالة من الحالات قَبِسَ التوتر وزاوية الطور في جهتي الإرسال والاستقبال، والاستطاعة الحقيقية والردية في جهتي الإرسال والاستقبال واستُنتِجَ هبوط التوتر ومفايد الاستطاعة في خط النقل.

7- حالة استخدام خط نقل تيار مستمر عالي التوتر HVDC

يتألف خط النقل بالتيار المستمر من محطتي تبديل (مبدلات الكترونية ثيرستورية Line Commutated Voltage Source Converters (LCC)، أو ترانزستورية Converter (VSC) في جهتي الإرسال والاستقبال، مبدل توتر AC-DC في جهة الإرسال، ومبدل توتر DC-AC أو عاكس في جهة الاستقبال. إذ تعمل محطة الإرسال كمقوم لتحويل التيار المتناوب إلى تيار مستمر، وتعمل محطة الاستقبال كعاكس في الجسور الثيرستورية LCC أو كمعرج توتر في الجسور الترانزستورية VSC، لتحويل التيار المستمر مرة أخرى إلى تيار متناوب، ومع الكلفة المرتفعة لمحطات التبديل إلا أنّ ضياعات الاستطاعة أقل عند النقل بالتيار المستمر كما نحتاج إلى خطين فقط لنقل الاستطاعة المطلوبة بدلاً من ثلاثة خطوط في التوتر المتناوب، ومن ثمّ فإنّ حجم الأبراج المطلوب لحمل الأمراس الكهربائية أقل، كما أنّها أكثر وثوقية، ويمكن التحكم بالاستطاعة المنقولة على خط النقل

من الواحد، تلبيةً لمتطلبات وزارة الكهرباء مهما كانت التكاليف.

9- الخلاصة

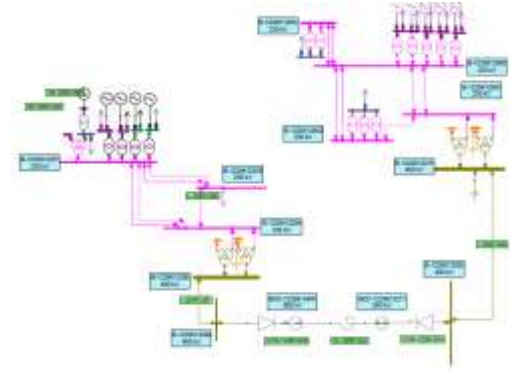
تبين نتيجة المقارنة بين المفايد وهبوطات التوتر في خطوط النقل بالتوتر المتناوب والتيار المستمر عالي التوتر HVDC أنه لدى اعتماد مقاطع الأبراس الهوائية نفسها أن الاستطاعة المفقودة على خط النقل انخفضت بمقدار (4.75MW) وهذا يكافئ نسبة (1.02%) من الاستطاعة المنقولة. كما أن هبوط التوتر على خط النقل في حالة استخدام نظام نقل بالتيار المستمر عالي التوتر قد انخفض إلى القيمة (0.1%) عوضاً عن القيمة التي سُجِلت في حالة التوتر المتناوب التي كانت تساوي (16.48kV).

كما أن نظام النقل بالتيار المستمر عالي التوتر أكد أن توترات قضبان التوزيع في محطة الإرسال والاستقبال لم تتغير عند استخدام هذا النظام. بينما في حالة التيار المتناوب يجب الانتباه إلى زوايا توتر الإرسال وتوتر الاستقبال، كما أن قيم توترات هذه القضبان ستأثر بقيمة الاستطاعة المنقولة.

كنظرة مستقبلية إلى هذا النظام يمكن القول أنه من الأفضل اعتماد نظام نقل بالتيار المستمر عالي التوتر للربط بين محطات التوزيع الكبيرة الاستطاعة حرصاً على استقرار الشبكة وعدم خروجها عن التزامن لدى حدوث أعطال أو حالات عدم توازن في إحدى المحطات أو المواقع القريبة من هذه المحطات، وبسبب إمكانية استخدام كابلات أرضية وتجنب الخطوط الهوائية مما يزيد وثوقية الشبكة.

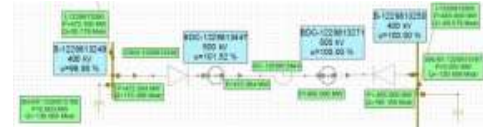
كما أنه لا بد من الإشارة إلى أن نظام النقل بالتيار المستمر لا يتأثر بتغير تردد الشبكة في محطة الإرسال والاستقبال.

الوفر بمفايد النقل يمكن أن يغطي خلال مدة قصيرة إلى متوسطة، التكاليف الإضافية اللازمة لإنشاء محطتي التبدل بالتيار المستمر في الإرسال والاستقبال، بما فيها



الشكل (8) مخطط تمثيل خط النقل المستمر

(الملحق A)



الشكل (9) نتائج تمثيل خط النقل المستمر (الملحق B)

(B)

الجدول (4) القيم العددية لنتائج تمثيل خط النقل

المستمر

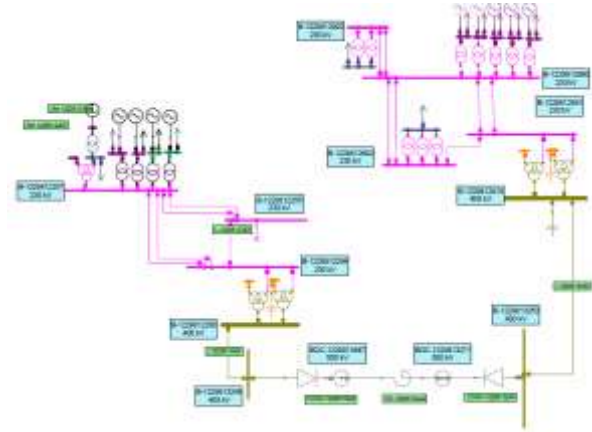
| | |
|-----------|--------|
| VS % | 99.95% |
| Vr % | 100% |
| IDC [kA] | 0.93 |
| PS [MW] | 472.3 |
| Qs [MVAr] | 30.8 |
| Pr [MW] | 465 |
| Qr [MVAr] | -69.6 |
| ΔP [MW] | 7.3 |

من الشكل (9) و الجدول (4)، يمكن حساب مفايد الاستطاعة الحقيقية في خط النقل المستمر، الفرق بين قيمتي الاستطاعة في الدخل والخرج (7.084MW). وبأخذ مردود المبدلات الالكترونية بالحسابان تصبح المفايد (7.3MW) إذ إن مردود المبدلات يبلغ 99%.

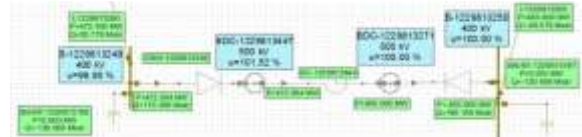
لكن تبقى مشكلة تأمين الاستطاعة الردية اللازمة لعمل المبدلات التي تبلغ [9] ثلث الاستطاعة المنقولة على خط النقل تقريباً، إذ أنه لنقل 465MW يحتاج المقوم إلى 170MVar، في حين يحتاج العاكس إلى 190MVar. ويجب تأمين هذه الاستطاعة عن طريق معوضات ردية (مجموعات مكثفات) للمحافظة على عامل استطاعة قريب

معوذات الاستطاعة الردية والمرشحات، فضلاً عن أنّ عدد الخطوط المطلوبة لنقل القدرة سيكون اثنين بدلاً من ثلاثة أمّراس.

إن مسألة استقرار التوتر في قضبان التوزيع الناجم عن استخدام مجموعات HVDC، سيسهم مستقبلاً في إضافة أي محطات توليد أو خطوط نقل جديدة دون أن تؤثر في استطاعة النقل، ونظام النقل واستقراره.



الشكل (8) مخطط تمثيل خط النقل المستمر



الشكل (9) نتائج تمثيل خط النقل المستمر (الملحق

(B)

Referances

- [1] www.researchgate.net
 [2] "ELECTRICAL POWER SYSTEMS"; Uppal S.L.; Rao S.; Khanna Publishers; New Dalhi, India; 15th edition, 2009. Pages432-380, 408-434.
 [3] Kennedy W.O.; "Transmission Lines Electricity's Highways"; P.Eng., FEIC Principal, b7kennedy & Associates Inc.; 2013.
 [4] "ELECTRICAL MACHINES DRIVES, AND POWER SYSTEM" Wildi T.; Speika Enterprises, Ltd.; Pearson Education. Inc, Upper Saddele River, New Jersey 07458, 6th edition, 2006. Pages 706-737, 788-814.
 [5] Chan J. & Adapa R.; "HVDC & FACTS Research at EPRI"; IEEE Electrical Power and Energy Conference, Winnipeg, Canada, October 4, 2011.
 [6] www.neplan.ch
 [8] Tang G.; "High Power Conversion Technology for High Voltage DC Transmission Application"; Global Energy Interconnection Research Institute (GEIRI),Sept. 2016.
 [9] Bahrman M.; " HVDC Technology Line Commutated Converters"; P.E., IEEE PES T&D, Chicago, April 15, 2014.
 [10] Davis K.R., Dutta S., Overbye T.J, Gronquist J;" Estimation of Transmission Line Parameters from Historical Data"; 46th Hawaii International Conference on System Sciences, 2013.

مسرد المصطلحات

| الرمز | الواحدة | المصطلح |
|-------------|----------------------|---|
| R | Ω | المقاومة الأومية |
| L | H | المحارضة |
| X_L | Ω | المفاعلة التحريضية |
| C | F | السعة |
| X_C | Ω | الممانعة السعوية |
| B | S | السماحية السعوية |
| ($N\phi$) | Wb | التدفق المغناطيسي |
| μ_0 | $2\pi \cdot 10^{-7}$ | النفاذية المغناطيسية للهواء |
| μ_r | | النفاذية المغناطيسية النسبية |
| B_x | Wb/m ² | كثافة الفيض المغناطيسي |
| H_x | H/m | كثافة الحقل الكهربائي عند نقطة تبعد مسافة x عن مركز الناقل. |
| ϕ | Wb | الفيض المغناطيسي |
| d | m | ثابت أبعاد خط النقل الثلاثي الطور |
| D | m | ثابت أبعاد خط النقل الحزمي المزدوج |
| A | mm ² | مقطع الناقل |
| r | mm | نصف قطر الناقل |
| k_0 | F | ثابت السعة التسريبيه لمادة الناقل |
| ρ | $\Omega \cdot m$ | المقاومة النوعية لمعدن الناقل |
| α_0 | -- | عامل المقاومة النوعية عند درجة الحرارة النظامية |
| m | -- | معامل حساب الظاهرة القشرية |
| f | Hz | التردد |
| I_d | kA | التيار المستمر |
| E_S | kV | التوتر المستمر في الإرسال |
| E_R | kV | التوتر المستمر في الاستقبال |
| R_{DC} | Ω | المقاومة الأومية لخط النقل المستمر |
| V_S | kV | توتر الإرسال |
| V_r | kV | توتر الاستقبال |
| ΔV | kV | هبوط التوتر |
| P_S | MW | الاستطاعة الحقيقية في الإرسال |
| Q_S | MVar | الاستطاعة الردية في الإرسال |
| P_r | MW | الاستطاعة الحقيقية في الاستقبال |
| Q_r | MVar | الاستطاعة الردية في الاستقبال |
| ΔP | MW | مفايد الاستطاعة الحقيقية |
| ΔQ | MVar | مفايد الاستطاعة الردية |

| | | |
|--------------------|-----------|------------------|
| Received | 9/4/2019 | إيداع البحث |
| Accepted for Publ. | 29/7/2019 | قبول البحث للنشر |