

Dalam keadaan daya injeksi simpul konstan, perubahan vektor keadaan yang sudah ada setelah penambahan saluran k adalah:

$$\Delta\theta = \Delta XP = \beta_k X e_k \phi_k \quad (11)$$

dimana $\phi_k = \theta_i - \theta_j$ adalah selisih sudut fasa terminal cabang k sebelum penambahan saluran.

Vektor keadaan (*state vector*) jaringan baru diberikan oleh:

$$\theta = \theta + \Delta\theta = \theta + \beta_k X e_k \phi_k \quad (12)$$

.Daya yang mengalir pada saluran k dalam bentuk matriks diperoleh:

$$P_L = B_L \phi_k \quad (13)$$

Pembebanan lebih saluran ditentukan dengan persamaan:

$$|P_k| \leq \bar{P}_k \quad (14)$$

dimana P_k adalah aliran daya perhitungan pada saluran k . \bar{P}_k adalah kapasitas daya saluran k .

3. Metode Penelitian

Jaringan transmisi 500 kV Sistem Jawa-Bali yang sudah ada (*existing lines*) dan saluran-saluran pengembangan (*possible lines*) dihubungkan satu per satu. Berdasarkan hubungan tersebut akan diperoleh model Jaringan Transmisi 500 kV Sistem Jawa-Bali yang baru sesuai perencanaan jaringan transmisi tahun yang direncanakan. Selanjutnya, analisis aliran beban dilakukan dengan jaringan model, hasil akhir akan diperoleh pengembangan jaringan transmisi yang efektif selama rentang tahun perencanaan.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Analisis Pengembangan Jaringan Tahun 2007

Saluran pengembangan dan saluran yang sudah ada dihubungkan sehingga membentuk sebuah model jaringan baru. Sebelum saluran pengembangan dihubungkan matrik impedansi sistem X_o diperoleh: $X_o = B_o^{-1}$

Daya injeksi simpul jaringan dihitung dengan persamaan:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = 3.400 - 195,36 = 3.204,64 \text{ MW}$$

Dengan cara yang sama matriks daya injeksi simpul diperoleh:

$$P_i = [3.204,64; -692,74; -425; -682,18; -700,13; -425; -696,16; -887,04; -823,68; 2138; -838,46; 360,86; -285,12; -360,1; 2.458; 598,2; -642; 809,6; -283,1; 595,6; -337,92; 601,92]^T$$

Besar sudut tegangan simpul θ_o dihitung menurut persamaan (4): $\theta_o = X_o \times P_i$

$$\theta_o = 10^4 [0,2752; 0,2516; 0,0960; 0,0190; -0,0099; 0,0185; 0,0053; -0,0355; -0,0123; 0,0653; 0,0110; 0,0123; 0,3481; 0,4364; 0,5522; 1,0433; 0,9529; 0,7820; 0,8076; 0,6429; 0,5359; 0,1869; 0,0211]^T$$

Besar selisih sudut fasa tegangan simpul sebelum saluran tunggal Balaraja-Bajanegara dibangun diperoleh: $\phi_k = \theta_i - \theta_j$, $k = 1, 2, 3, \dots, 27$

Dalam bentuk matriks diperoleh:

$$\phi_o = 10^4 [0,2360; 1,7920; 2,4630; 0,7700; 0,2869; 0,0050; 0,1320; -3,2960; 0,4080; 0,0530; -0,2320; -0,7760; 0,5430; -0,0130; 0,1230; -0,8830; -1,1580; -0,9950; -4,9110; 0,9040; 1,7090; -0,2560; 1,3910; 1,0700; 3,4900; 1,6580; 0,2110]^T$$

Besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$$P_{L0} = [1.378,24; 1.824,25; 687,17; 1.399,86; 700,54; 17,54; 451,18; -856,96; 391,27; 48,12; -493,70; -1.319,98; 819,93; -20,57; 342,17; -1.142,60; -1.344,44; -481,58; -1.704,12; 753,03; 1.351,82; -807,68; 1.520,36; 1.235,85; 1.350,63; 1.013,04; 410,61]^T$$

Kemudian setelah dibangunnya saluran tunggal Balaraja-Bajanegara dan GITET 500 kV BJNGR terjadi perubahan jumlah elemen matriks simpul, sehingga matrik impedansi jaringan sistem transmisi yang baru menjadi: $X_o' = B_o'^{-1}$

Daya injeksi simpul jaringan baru diperoleh:

$P_i' = [3.204,64; -692,74; -425; -425; -682,18; -700,13; -425; -696,96; -887,04; -823,68; 2138; -838,46; 360,86; -285,12; -360,1; 2.458; 598,2; -642; 809,6; -283,1; 595,6; -337,92; 601,92]^T$

Besar sudut tegangan simpul θ_o' dihitung menurut persamaan (4): $\theta_o' = X_o' P_i'$

$\theta_o' = 10^4 [0,2121; 0,1899; 0,0250; -0,0451; -0,0330; -0,0619; -0,0235; -0,0276; -0,0593; -0,0319; 0,0508; 0,0023; 0,0091; 0,3209; 0,4121; 0,5286; 1,0220; 0,9324; 0,7625; 0,7882; 0,6242; 0,5178; 0,1787; 0,0192]^T$

Besar selisih sudut fasa tegangan simpul sebelum saluran tunggal Balaraja-Bajanegara dibangun diperoleh: $\phi_k = \theta_i - \theta_j, k = 1, 2, 3, \dots, 28$

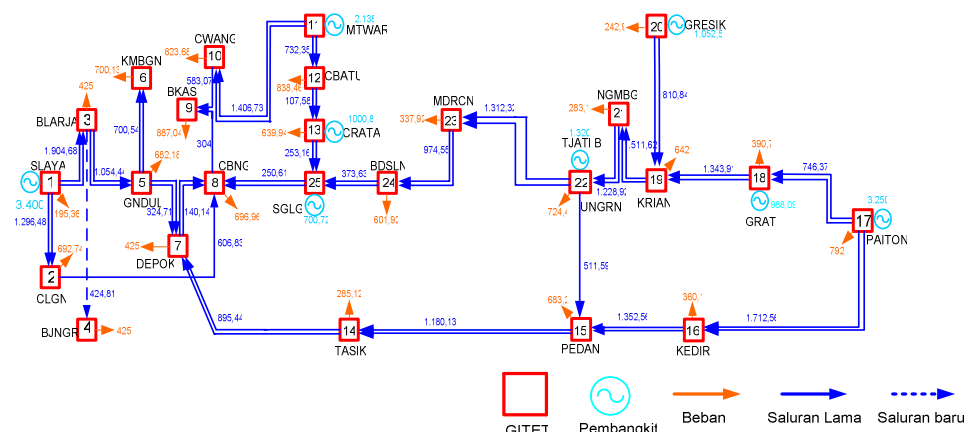
Dalam bentuk matriks diperoleh:

$\phi_o' = 10^4 [0,2220; 1,8710; 2,1750; 0,7010; 0,5800; 0,2890; -0,0950; 0,0410; -3,4440; 0,3170; -0,2760; -0,2740; -0,8270; 0,4850; -0,0680; 0,0910; -0,9120; -1,1650; -1,0570; -4,9340; 0,8960; 1,6990; -0,2570; 1,3830; 1,0640; 3,3910; 1,5950; 0,1920]^T$

Besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$P_{L0}' = [1.296,48; 1.904,68; 606,83; 424,81; 1.054,44; 700,54; -324,71; 140,14; -895,44; 304,00; -250,61; -583,07; -1.406,73; 732,35; -107,58; 253,16; -1.180,13; -1.352,57; -511,59; -1.712,10; 746,37; 1.343,91; -810,84; 1.511,62; 1.228,92; 1.312,32; 974,55; 373,63]^T$

Pengembangan saluran tunggal Balaraja-Bajanegara terkait dengan pembangunan GITET 500 kV BJNGR untuk mengalihkan beban GITET 500 kV CLGN yang diperkirakan tahun 2007 telah memikul beban 102 persen dari kapasitas dayanya menurut asumsi pertumbuhan beban puncak 5,6 persen. Adapun GITET 500 kV Ngimbang dibangun untuk mengalihkan beban GITET 500 kV Krian yang diperkirakan telah mencapai pembebanan 94 persen dari kapasitasnya. Beban saluran berada pada kondisi aman dengan beban saluran tertinggi terjadi pada saluran ganda Suralaya-Balaraja 48 persen dari kapasitas dayanya.



Gambar 2. Prakiraan daya mengalir pada setiap saluran pada tahun 2007

4.2 Analisis Pengembangan Jaringan Tahun 2010

Pada kondisi sebelum saluran Balaraja-Kembangan dibangun diperoleh matriks admitansi B_1 , sehingga: $X_1 = B_1^{-1}$

Besar sudut tegangan simpul θ_1 dihitung menurut persamaan (4), besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$$P_{L1} = [1.459,42; 2.312,08; 768,65; 496,44; 1.1319,50; 700,05; -62,89; 89,89; -649,40; 505,00; -333,24; -523,28; -1.477,83; 660,02; -311,81; -52,58; -979,94; -1.204,09; -1.561,20; -435,07; -1.978,52; 953,45; 578,90; 1.033,44; -771,40; 1.162,73; 816,24; 1.060,24; 835,55; 1.044,18; 595,35; -102,36]^T$$

Kemudian setelah saluran Balaraja-Kembangan dibangun terjadi perubahan besaran impedansi matrik sendiri (*self impedance matrix*) terhadap simpul Balaraja dan Kembangan dengan matriks admitansi B_1' , sehingga: $X_1' = B_1'^{-1}$. Perubahan matriks impedansi simpul inkremental diberikan persamaan (10): $\Delta X_1 = X_1' - X_1$. Perubahan vektor keadaan yang sudah ada setelah penambahan saluran Balaraja-Kembangan dihitung menurut persamaan (11) adalah: $\Delta \theta_1 = \Delta X_1 \cdot P_{L1}$. Vektor keadaan (*state vector*) jaringan baru diberikan oleh menurut persamaan (12): $\theta_1' = \theta_1 + \Delta \theta_1$, dimana $\phi_k = \theta_i - \theta_j$ adalah selisih sudut tegangan simpul jaringan baru setelah penambahan saluran, besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$$P_{L1}' = [1.387,58; 2.384,05; 696,77; 496,37; 624,66; 766,47; -66,42; 8,89; 160,30; -647,66; 504,53; -334,60; -523,49; -1.478,34; 659,72; -312,13; -53,14; -978,09; -1.202,63; -1.560,73; -433,71; -1.978,15; 953,87; 578,90; 1.033,84; -771,40; 1.163,17; 816,59; 1.061,98; 837,37; 1.045,88; 597,06; -100,61]^T$$

Berdasarkan hasil perhitungan dibangunnya saluran ganda Balaraja-Kembangan sangat efektif untuk membentuk konfigurasi jaringan sistem transmisi melingkar sehingga menambah fleksibilitas penyaluran daya menuju Gandul. Disamping itu, dibangunnya saluran ganda Balaraja-Kembangan mengurangi pembebanan saluran ganda Balaraja-Gandul dari 33 persen menjadi 16 persen dari kapasitas dayanya.

4.3 Analisis Pengembangan Jaringan Tahun 2011

Sebelum saluran Cibatu-Mandirancan dibangun ukuran matriks admitansi sama dengan tahun 2010 karena jumlah simpulnya tidak berubah, sehingga: $X_2 = X_1'$

Besar sudut tegangan simpul θ_2 dihitung menurut persamaan (4), besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$$P_{L2} = [1.369,48; 2.392,20; 678,28; 524,19; 596,12; 747,56; -47,27; -38,28; -3,42; -559,52; -521,41; -533,00; -553,71; -1.552,16; 585,73; -430,46; -205,31; -905,17; -1.142,05; -1.507,44; -462,90; -1.943,94; 946,04; 611,30; 993,65; -758,46; 1.110,05; 744,17; 960,31; 723,20; 913,70; 439,71; -289,76]^T$$

Selanjutnya, setelah saluran Cibatu-Mandirancan dibangun terjadi perubahan besaran impedansi matrik sendiri (*self impedance matrix*) terhadap simpul Cibatu dan Mandirancan dengan matriks admitansi B_2' , sehingga $X_2' = B_2'^{-1}$.

Besar sudut tegangan simpul θ_2' dihitung menurut persamaan (12), besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$$P_{L2}' = [1.387,58; 2.384,05; 696,77; 496,37; 624,66; 766,47; -66,42; 8,89; 160,30; -647,66; 504,53; -334,60; -523,49; -1.478,34; 659,72; -312,13; -53,14; -978,09; -1.202,63; -1.560,73; -433,71; -1.978,15; 953,87; 578,90; 1.033,84; -771,40; 1.163,17; 816,59; 1.061,98; 837,37; 1.045,88; 597,06; -100,61]^T$$

Pengembangan saluran tunggal Cibatu-Mandirancan akan meningkatkan fleksibilitas penyaluran daya karena terbentuknya konfigurasi jaringan sistem transmisi melingkar. Beban saluran tertinggi dialami saluran Suralaya-Balaraja sebesar 60 persen dari kapasitas dayanya, peningkatan beban saluran ini karena adanya penambahan kapasitas pembangkit Suralaya.

4.4 Analisis Pengembangan Jaringan Tahun 2012

Ukuran matriks impedansi X sistem pada tahun 2012 tidak sama dengan dengan tahun 2011 karena dibagunnya GITET 500 kV Bangil, sehingga $X_3 = B_3^{-1}$.

Besar sudut tegangan simpul θ_3 dihitung menurut persamaan (4), besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$$P_{L3} = [1.451,82; 2.298,95; 761,11; -196,40; 955,18; 986,81; -286,76; 521,25; 138,09; -170,04; 605,70; -431,84; -516,68; -1.559,31; 578,63; -402,94; -79,04; -211,99; -530,83; -780,99; -1.130,58; -514,88; -1.586,20; -2.011,16; 836,83; 645,20; 850,56; -745,53; 918,15; 531,76; 695,83; 445,41; 539,05; 38,43; -722,939]^T$$

Selanjutnya, setelah saluran ganda bajanegara-Depok dibangun terjadi perubahan besaran impedansi matrik sendiri (*self impedance matrix*) terhadap simpul Bajanegara dan Depok dengan matriks admitansi B_3' , sehingga $X_3' = B_3'^{-1}$.

Vektor keadaan jaringan sistem transmisi baru θ_3' dihitung menurut persamaan (12), besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$$P_{L3}' = [1.423,21; 2.327,66; 732,43; 63,57; 816,46; 894,47; 259,97; -194,16; 289,85; 165,77; -169,31; 605,51; -432,30; -516,68; -1.559,65; 578,48; -402,94; -79,24; -211,99; -530,14; -780,26; -1.130,35; -514,35; -1.586,08; -2.010,96; 837,00; 645,20; 850,72; -745,53; 918,26; 531,88; 696,61; 446,14; 539,54; 39,03; -722,55]^T$$

Pembangunan saluran Bajanegara-Depok sangat penting terkait dengan masuknya pembangkit baru ke sistem sehingga menambah pasokan daya yang disalurkan melalui GITET Bajanegara menuju GITET Depok.

4.5 Analisis Pengembangan Jaringan Tahun 2013

Matriks impedansi X sistem pada tahun 2013 tidak sama dengan dengan tahun 2012 karena masuknya GITET 500 kV Tambun dan tersambung nya pembangkit baru Cisokan ke sistem, sehingga $X_4 = B_4^{-1}$.

Besar sudut tegangan simpul θ_4 dihitung menurut persamaan (4), besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), diperoleh:

$$P_{L4} = [1.489,20; 2.251,61; 798,14; -268,46; 954,00; 1.003,54; 665,99; -264,46; 454,25; 847,32; -125,58; -166,79; 1.012,32; -337,41; 244,84; 18,51; -904,62; -1.326,85; 808,45; -193,48; -103,07; -36,17; -114,40; 611,46; -57,18; -321,40; -964,56; -257,29; -1.439,35; -1.888,12; 917,97; 678,40; 898,26; -732,59; 915,10; 507,06; 928,70; 664,66; 715,86; 187,14; -606,37]^T$$

Selanjutnya, setelah saluran tunggal Cibinong-Tambun dibangun terjadi perubahan besaran impedansi matrik sendiri (*self impedance matrix*) terhadap simpul Cibinong dan Tambun dengan matriks admitansi B_4' , sehingga $X_4' = B_4'^{-1}$.

Vektor keadaan jaringan sistem transmisi baru θ_4' dihitung menurut persamaan (12), besar daya mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13), sehingga diperoleh:

$$P_{L4}' = [1.489,78; 2.250,80; 798,97; -268,60; 950,45; 1.003,29; 665,87; -263,97; 453,91; 862,02; -133,87; -174,00; 892,25; 202,32; -397,07; 197,67; -101,51; -1.024,46; -1.245,15; 890,90; -123,24; -91,24; 34,22; -116,91; 586,03; -66,67; -331,13; -966,88; -264,84; -1.441,54; -1.890,23; 915,63; 678,50; 896,12; -732,59; 912,80; 504,85; 919,04; 654,48; 718,05; 189,33; -604,23]^T$$

Pengembangan saluran tunggal Cibinong-Tambun akan menambah fleksibilitas penyaluran daya karena terbentuknya konfigurasi sistem transmisi melingkar yang akan terhubung melalui GITET 500 kV baru TMBUN yang dibangun untuk mengurangi pembenanan GITET Cawang

dan Bekasi, masing-masing diperkirakan akan dibebani 85 persen dan 95 persen dari kapasitas dayanya.

4.6 Analisis Pengembangan Jaringan Tahun 2016

Semua saluran pengembangan dan saluran yang sudah ada dihubungkan sehingga membentuk model konfigurasi jaringan sistem transmisi seperti pada gambar 3. Diperoleh Matriks admitansi B_5 sistem yang baru, maka didapatkan: $X_5 = B_5^{-1}$

Vektor keadaan sistem yang baru diperoleh:

$$\theta_5 = 10^4 [5,2986; 5,0195; 3,2559; 5,3044; 2,5205; 2,7101; 2,2547; 1,6532; 0,5441; 0,5114; 1,0147; 1,2777; 0,4522; 0,2200; 2,0614; 2,2510; 2,1878; 2,2605; 2,7726; 3,7031; 5,3855; 4,7731; 4,3662; 3,5357; 3,5098; 3,7297; 3,0598; 3,0664; 2,4166; 2,4242; 1,0723; 0,1756; -0,0192]^T$$

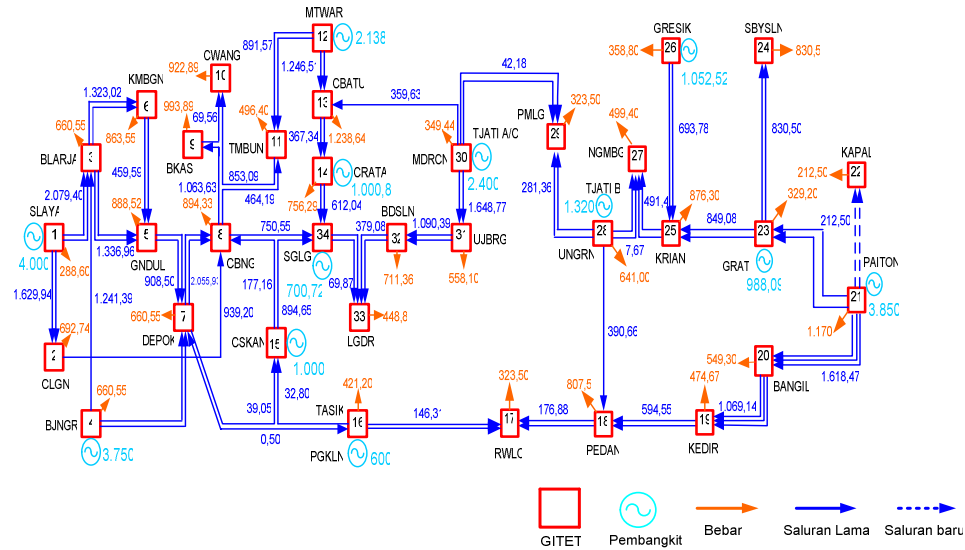
Dan daya yang mengalir pada setiap saluran dihitung menurut persamaan (13) diperoleh:

$$P_{L5} = [1.629,94; 2.079,47; 939,20; -1.241,39; 1.336,96; 1.323,02; 1.848,12; -459,59; 908,50; 2.055,93; 39,05; 0,50; 1.063,63; 464,19; -177,16; 750,55; 69,59; -853,09; -891,57; 1.246,51; 367,34; -359,63; 612,04; -32,80; 894,65; 146,31; -176,88; -594,55; -390,06; -1.069,14; -1.618,47; 212,50; 849,08; 830,50; 677,41; -693,78; 491,40; -7,62; 281,36; -42,18; 1.648,77; 1.090,39; 379,08; -69,81]^T$$

Hasl perhitungan menunjukkan bahwa diperkirakan pada tahun 2016 beban saluran berada di bawah 70 persen dari kapasitas dayanya. Beban tertinggi dialami saluran tunggal Balaraja-Bajanegara sebesar 63 persen dari kapasitasnya.

5. Kesimpulan

1. Pembangunan saluran tunggal Balaraja-Bajanegara tahun 2007 yang direncanakan PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali sangat efektif untuk menyalurkan daya ke GITET 500 kV BJNGR yang dibangun untuk mengurangi beban GITET 500 kV CLGN yang diperkirakan bebannya sudah mencapai 102 persen dari kapasitasnya.
2. Pembangunan saluran ganda Balaraja-Kembangan tahun 2010 menyalurkan daya 20 persen dari kapasitas dayanya akan meningkatkan fleksibilitas pasokan daya ke GITET 500 kV Kembangan. Di samping itu dibangunnya saluran ganda Balaraja-Kembangan ini dapat menjadi alternatif penyaluran daya dari Balaraja ke Gandul sehingga terbentuk konfigurasi jaringan sistem transmisi melingkar (*ring transmission system network*).
3. Saluran tunggal Cibatu-Mandirancan yang dibangun pada tahun 2011 sangat efektif untuk membentuk konfigurasi jaringan sistem transmisi melingkar, sehingga menambah fleksibilitas penyaluran daya dari Cibatu ke Mandirancan atau sebaliknya .
4. Dibangunnya saluran ganda Bajanegara-Depok pada tahun 2012 terkait dengan pembangunan pembangkit baru yang masuk melalui GITET 500 kV Bajanegara. Saluran ini akan menjadi saluran utama penyaluran daya menuju GITET 500 kV Depok sehingga mengurangi beban saluran tunggal Bajanegara-Balaraja apabila kapasitas penuh pembangkit 3.750 MW pada tahun 2016.
5. Pembangunan saluran tunggal Cibinong-Tambun tahun 2013 membentuk konfigurasi sistem transmisi melingkar untuk meningkatkan fleksibilitas penyaluran daya dari Cibinong-Bekasi atau Cibinong-Tambun.
6. Pada tahun 2016 persentase penyaluran daya setiap saluran berada di bawah 70 persen dari kapasitas dayanya. Beban tertinggi terjadi pada saluran tunggal Bajanegara-Balaraja sebesar 63 persen dari kapasitas dayanya.



Gambar 3. Prakiraan daya yang mengalir pada setiap saluran tahun 2016.

Daftar Pustaka

1. Allen J.Wood, Bruce F. Wollenberg. 1996. *Power Generation Operation and Control*. John Wiley & Sons. New York.
2. Nurhalim, 2008 "Analisis Kepekaan Pengembangan Jaringan Transmisi Tenaga Listrik Menggunakan *Successive Backward Method*, Studi Kasus: Jaringan 500 kV Sistem Jawa-Bali". *Prosiding Seminar UNRI-UKM ke-5*. Pekanbaru 19-20 (8): 201-212.
3. PT.P3B Jawa Bali. 2006. *Data Perencanaan 2007 – 2016*. PT. PLN (Persero). Jakarta.
4. PT.P3B Jawa Bali. 2004. *Rencana Penyediaan Tenaga Listrik 2004-2013*. PT. PLN (Persero). Jakarta.
5. Wang X, J. R. McDonald. 1994. *Modern Power System Planning*. McGraw-Hill Book Company. UK.