

Analisa Pengaruh Panjang Gap Arcing Horn Terhadap Jumlah Trip-out Pada Saluran Transmisi 150 kV Payakumbuh – Koto Panjang

Yusreni Warmi*, Tri Okta Viyoldi
 Institut Teknologi Padang, Padang
 E-mail: mn_nafi@yahoo.com

ABSTRACT

The 150 kV transmission line Payakumbuh-Koto Panjang has a channel length of 86 km, the number of 248 tower towers, and the number of dominant trip-out occurs in towers located on the hill. The results of this study indicate the level of trip-out affects the gap length arcing horn. When the length of the 1.3 m arcing horn obtained an insulator voltage of minus 10% from BIL (Basic Insulation Level) on dry insulators, and when the length of an arcing horn is 0.9 m, the isolator voltage is minus 10% of BIL for the insulator wet. The length of the 1.3-meter arcing horn gap can reduce the flashover of 121 flashover 100 km/year to 22 flashovers 100 km/year. The results also show that flashovers occur at insulator humidity levels below 60%.

Keywords: Lightning trip-outs, transmission line, length of an arcing horn gap.

ABSTRAK

Saluran transmisi 150 kV Payakumbuh-Koto Panjang memiliki panjang saluran 86 km, jumlah menara 248 menara, dan jumlah trip-out yang dominan terjadi pada menara yang terletak di bukit. Hasil penelitian ini menunjukkan tingkat trip-out berpengaruh pada panjang gap arcing horn. Ketika panjang gap arcing horn 1.3 m didapatkan tegangan isolator minus 10% dari BIL (*Basic Insulation Level*) pada isolator kering, dan pada saat panjang arcing horn 0.9 m tegangan isolator minus 10% dari BIL untuk isolator dalam keadaan basah. Panjang dari gap arcing horn yang dipasang 1.3 m, dapat mengurangi flashover dari 121 flashover 100 km/tahun menjadi 22 flashover 100 km/tahun. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwasanya flashover terjadi pada tingkat kelembaban isolator dibawah 60%.

Kata kunci: Trip-out petir, saluran transmisi, panjang dari gap arcing horn.

1. PENDAHULUAN

Saluran transmisi 150 kV Payakumbuh- koto panjang memiliki panjang saluran 86 km, memiliki 248 menara dengan 4 tipe menara yaitu tipe AA, tipe BB, tipe CC dan tipe DD. Penyebab utama terjadinya trip-out pada saluran transmisi Payakumbuh-Koto Panjang adalah petir yakni 66 % [1,2], tingkat trip-out petir dapat berkurang tergantung pada panjang *gap arcing horn*. Berdasarkan data UPT Padang 2010-2014, tingkat trip-out petir sebelum dan setelah perbaikan tahanan kaki menara di tunjukan sebagai fungsi panjang dari *gap arcing horn*. Jika panjang gap arcing horn berkisar antara 0.9 m sampai 1.0 m tingkat trip-out lebih tinggi dibandingkan panjang *gap arcing horn* 1.3 m sebelum dan setelah terjadinya perbaikan tahanan pentanahan kaki menara. Hal ini disebabkan oleh tegangan *flashover* menurun dengan menurunnya panjang dari *gap arcing horn* [2,3].

Untuk membuat system transmisi menjadi lebih handal, maka dilakukan beberapa usaha untuk mengurangi sambaran petir pada saluran transmisi. Adapun usaha- usaha yang telah dilakukan adalah perbaikan terhadap tahanan pentanahan kaki menara atau menara berdasarkan standar SPLN 2000 [3],

melakukan pemasangan *Transmission Lightning Arrester* (TLA) dan pemasangan kawat tanah atau *Ground Steel Wire* (GSW). Setelah dilakukan usaha-usaha tersebut diatas, tetapi jumlah trip-out yang disebabkan oleh petir masih tinggi. Berdasarkan data UPT Padang tahun 2010-2018 jumlah trip-out yang disebabkan oleh petir adalah 66 % [1-6].

Dari hal tersebut dapat dilihat bahwa jumlah gangguan petir yang menyebabkan trip-out masih tinggi, maka dilakukan usaha yaitu evaluasi untuk perhitungan jarak *arc ing horn* agar saluran transmisi dapat beroperasi secara optimal dan dapat mengurangi jumlah trip-out yang terjadi. Panjang jarak arcing horn sangat mempengaruhi jumlah gangguan petir, panjang *gap arcing horn* diatur 75% hingga 85% dari panjang tali isolator 1.2 meter hingga 1.6 meter dengan jumlah rentengan isolator adalah 11 [3,5,6]. Jika jarak *arc ing horn* terlalu pendek maka akan menyebabkan trip-out pada sistem, jika jarak *arc ing horn* terlalu panjang, maka akan menyebabkan kerusakan pada isolator.

Untuk itu perlu dilakukan analisa perhitungan jarak optimal pada *arc ing horn* agar pada saat terjadinya petir tidak terjadi trip-out dan kerusakan pada isolator.

2. SALURAN TRANSMISI

Saluran transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari generator station atau dari pembangkit listrik menuju *distribution station* hingga sampai ke konsumen pengguna listrik, saluran transmisi, dan system distribusi. Saluran transmisi merupakan rantai penghubung antara pusat pembangkit listrik dengan system distribusi.

2.1 Saluran Udara

Saluran udara (*overhead lines*) merupakan saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antar menara atau tiang transmisi. Keuntungan saluran transmisi udara adalah lebih murah, mudah dalam perawatan, mudah dalam mengetahui letak gangguan, mudah dalam perbaikan dan lainnya. Namun juga memiliki kerugian antara lain. Karena berada di ruang terbuka, maka cuaca sangat berpengaruh terhadap keandalannya. dengan kata lain mudah terjadi gangguan, seperti gangguan hubung singkat, gangguan tegangan lebih karena sambaran petir, dan gangguan-gangguan lainnya. Dari segi keandalan juga kurang, sehingga saluran transmisi bukan pilihan yang ideal untuk suatu saluran transmisi di dalam kota [6-8].

2.2 Kabel Bawah Tanah

Saluran kabel bawah tanah (*undrground cable*) merupakan saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dibenam didalam tanah. Kabel bawah tanah biasanya terdiri atas satu atau lebih konduktor dengan lapisan pelindung berupa material isolasi.

3. ARCING-HORN

Arcing horn disebut sebagai tanduk api yang biasanya dipasang pada ujung kawat saluran dan ujung tanah dari isolasi atau groundingnya. bentuknya sedemikian rupa sehingga busur api yang terjadi pada saat adanya gangguan tidak akan mengenai isolator sewaktu lompatan api itu terjadi [7-16].

3.1 Fungsi Arcing-horn

Arcing horn merupakan pelindung isolator atau bushing pada trafo, sehingga apabila terjadi lompatan api [*flash over*] yang terjadi pada gandingan isolator atau bushing agar isolator atau bushing tidak rusak karena busur apinya dapat menyebabkan gangguan operasional.

Media pelepasan busur api dari tegangan lebih antara sisi *chold* dan hot (kawat penghantar) pada jarak yang diinginkan berguna untuk memotong

tegangan lebih bila terjadi : sambaran petir, *switching*, gangguan, sehingga dapat mengamankan peralatan yang lebih mahal di Gardu Induk [10-13].

3.2 Panjang Gap Arcing Horn

Tingkat trip-out petir sebelum dan setelah perbaikan tahanan kaki menara di tunjukan sebagai fungsi panjang dari gap arcing horn seperti terlihat pada gambar 4. Frekuensi dari trip-out pada menara yang mempunyai panjang gap arcing horn antara 0.9 m sampai 1.0 m lebih tinggi dari pada menara yang mempunyai panjang gap arcing horn lebih panjang dari 1.3 m sebelum dan setelah terjadinya perbaikan tahanan kaki menara. Hal ini disebabkan oleh tegangan flashover menurun dengan menurunnya panjang dari gap arcing horn [3-5].

4. METODE DAN ANALISIS

Penulis mengestimasi tingkat trip-out petir dengan menggunakan metode Anderson method. Simulasi dilakukan pada menara No. 1 sampai dengan menara No. 248, saluran transmisi sirkuit ganda, dan panjang saluran 86 km serta rata-rata panjang span adalah 333 m. Analisis yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah analisis pengaruh panjang dari gap arcing horn isolator pada saat isolator dalam keadaan basah dan kering (*Upper, Middle, Lower*). dengan menggunakan ATP-EMTP Sehingga nantinya dapat diperoleh panjang gap *arcing horn* optimal pada saat sambaran petir di *upper, middle* dan *lower* [10-21].

4.1 Data Menara

Untuk analisa dan perhitungan maka diperlukan data yang berkaitan dengan pembahasan tersebut, adapun data tersebut dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah ini:

Tabel 1 Deskripsi Data Secara Umum

No.	Keterangan	Nilai
1	Jenis Saluran	SUTT 150 kV
2	Panjang Saluran	86 km
3	Jenis Tower	AA, BB, CC, DD
4	Lebar Kaki Menara	5 m
5	IKL	173 hari/tahun

Dari investigasi data yang telah dilakukan maka didapatkan 32 tower yang mengalami gangguan lebih dari dua kali yakni pada tahun 2009-2018 dengan mengklasifikasikan data sebelum tahun 2015 dan sesudah tahun 2015. Tower yang di analisa adalah tower dengan nomor 1-140 yang berada pada daerah IKL 173 hari/tahun sedangkan tower 141-248 yang berada pada Isokeraunik Level 22-25 hari/tahun [1-5].

Tabel 2 Data realisasi perbaikan panjang gap arcing horn pada Menara

NO	Nomor Tower	Jarak Arcing Horn (m)						Banyak Gangguan
		R		S		T		
		Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
1	31	0.92	1.36	0.91	1.36	0.91	1.36	
2	42	0.95	1.36	0.94	1.36	0.93	1.36	
3	43	0.95	1.36	0.94	1.36	0.94	1.36	2
4	44	0.98	1.36	0.97	1.35	0.97	1.36	1
5	45	0.97	1.36	0.96	1.36	0.95	1.36	
6	47	0.92	1.36	0.91	1.36	0.92	1.36	2
7	48	0.98	1.36	0.97	1.36	0.97	1.35	5
8	49	0.98	1.36	0.97	1.36	0.98	1.36	
9	51	0.95	1.36	0.94	1.36	0.94	1.36	
10	53	0.95	1.36	0.95	1.36	0.95	1.36	
11	56	0.95	1.36	0.94	1.36	0.95	1.36	1
12	57	0.93	1.35	0.94	1.36	0.95	1.36	2
13	58	0.96	1.36	0.96	1.36	0.94	1.36	
14	59	0.94	1.36	0.96	1.36	0.96	1.36	2
15	60	0.95	1.36	0.91	1.35	0.92	1.36	3
16	61	0.95	1.36	0.95	1.36	0.95	1.35	4
17	64	1.17	1.36	1.17	1.35	1.17	1.36	
18	67	0.95	1.36	0.95	1.36	0.95	1.36	2
19	70	1.02	1.36	1.02	1.36	1.02	1.36	4
20	71	1.02	1.36	1.02	1.36	1.02	1.36	2
21	74	1.02	1.36	1.02	1.36	1.02	1.36	1
22	87	1.15	1.36	1.15	1.36	1.15	1.36	
23	101	0.93	1.36	0.94	1.36	0.94	1.36	4
24	102	0.95	1.35	0.94	1.36	0.94	1.35	1
25	104	0.95	1.36	0.94	1.35	0.93	1.36	
26	105	0.95	1.36	0.94	1.35	0.94	1.36	1
27	106	0.93	1.36	0.93	1.35	0.94	1.36	
28	114	0.94	1.36	0.94	1.35	0.95	1.36	1
29	115	0.96	1.36	0.96	1.36	0.97	1.36	1
30	119	0.98	1.36	0.97	1.36	0.95	1.36	2
31	120	0.94	1.36	0.94	1.36	0.94	1.36	

4.2 Analisa Perhitungan

Analisis perhitungan dilakukan dengan 2 metode yaitu Anderson Method dan Software ATP-EMTP.

Untuk nilai tahanan pentanahan menara pada Menara nomor 43 adalah = 33,5 ohm, maka akan didapatkan hasil perhitungan, tegangan *isolator flashover* pada waktu $2\mu s$ (V_t) Dengan menggunakan persamaan (1) pada waktu $2\mu s$ [10-18].

$$V_t = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}}\right) \times D \quad (1)$$

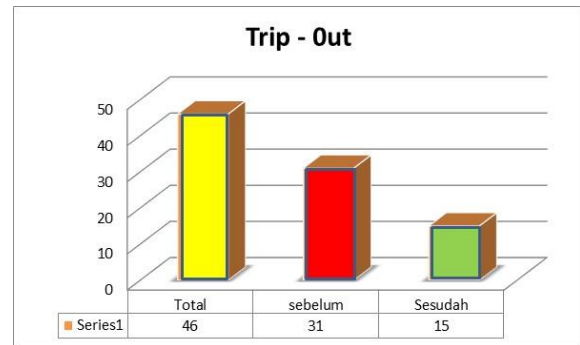
5. SIMULASI DAN DISKUSI

5.1 Tingkat Trip-out

Analisa pengaruh Panjang jarak gap arcing horn pada saluran udara tegangan tinggi Payakumbuh-Koto Panjang dengan meninjau besaran dari tahanan-pentanahan kaki menara yang terkena sambaran langsung dengan lebih menitik-beratkan kepada tower yang berada pada daerah *Iso keraunik level* yang tinggi yakni pada tower 1-140 memiliki *Iso keraunik level* 173 hari/Tahun. Perhitungan backflash- over ini mengklasifikasikan pentanahan sebelum perbaikan dan sesudah perbaikan.

Data yang digunakan data Tragi Payakumbuh sebagai daerah yang dijadikan observasi kinerja petir. Daerah ini dipilih karena merupakan daerah rawan petir yang memiliki jalur geografi perbukitan yang cukup banyak. Daerah Payakumbuh - Koto Panjang digolongkan rawan petir ke-dua di Indonesia yang memiliki hari guruh

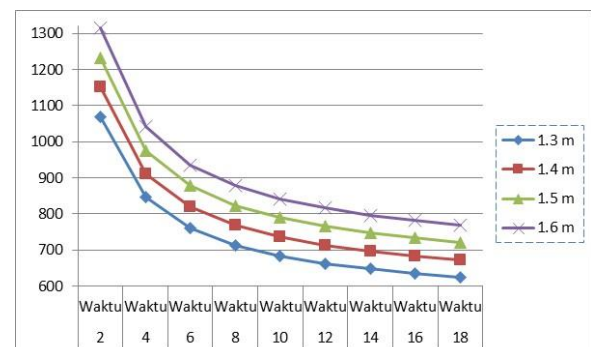
per tahunnya adalah 173 hari/tahun. Data yang digunakan pada analisa ini adalah data dari tahun 2009-2018.

**Gambar 1** Pengaruh panjang jarak arcing horn terhadap jumlah gangguan Petir.

Berdasarkan grafik di atas, yaitu mengelompokkan investigasi data sebelum dan sesudah perbaikan, dimana untuk data ivestigasi sebelum dikelompokkan dari tahun 2010-2014 dan untuk data investigasi sesudah di kelompokkan pada tahun 2015-2018. Jumlah gangguan yang disebabkan oleh petir pada tahun 2010-2018 yaitu 46 gangguan. Sebelum dilakukan perbaikan, total gangguan yang disebabkan oleh petir yaitu sebanyak 31 gangguan dengan panjang jarak arcing horn 0.9 m sampai 1 m. Setelah dilakukan perbaikan jarak arcing horn, jumlah gangguan yang disebabkan oleh petir yaitu 15 gangguan dengan menggunakan jarak arcing horn yaitu 1.36 m.

5.2 Tegangan Isolator

Saluran transmisi payakumbuh koto panjang menggunakan isolator dengan jumlah rentang isolator adalah 11. Jenis isolator yang digunakan adalah jenis porselen dimana setiap unit isolator mempunyai tegangan 110 kV dengan BIL (*Basic Insulation Level*) 1.21 MV. Untuk menentukan jarak optimal arcing horn maka dilakukan perhitungan jarak arcing horn 1.3 m - 1.6 m dan waktu lamanya flashover menggunakan perhitungan tegangan kritis isolator pada step 1 metode Anderson.

**Gambar 2** Tegangan kritis flashover.

Berdasarkan persamaan (1), untuk menentukan tingkat back flashover, dapat dilihat dari grafik di atas, Jika semakin panjang gap arcing horn yang digunakan, maka semakin besar tegangan flashover. Batas kritis tegangan isolator berada pada panjang gap arcing horn 1.36.

Tabel 3.a Sebelum dilakukan perbaikan

Tower	Tinggi	Arcing horn	Tahanan	CFO	Tegangan Isolator			BFO
					Upper	Middle	Lower	
43	26	0.95	33.5	781.06	15.77	19.68	22.13	126
60	26	0.95	24	781.06	12.29	15.31	17.11	95.9
101	29	0.94	32	772.84	17.09	19.87	21.72	140.21

- Tinggi dan arcing horn (m), CFO (kV), Tegangan Isolator (MV), BFO (flasover/100km/tahun)

Tabel 3.b Setelah dilakukan perbaikan

Tower	Tinggi	Arcing horn	Tahanan	CFO	Tegangan Isolator			BFO
					Upper	Middle	Lower	
43	26	1.36	5.39	1118.15	4.96	5.65	5.76	2.11
60	26	1.36	6.53	1118.15	5.41	6.27	6.51	3.27
101	29	1.36	1.65	1118.15	3.89	3.92	3.63	0.13

- Tinggi dan arcing horn (m), CFO (kV), Tegangan Isolator (MV), BFO (flasover/100km/tahun)

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa panjang gap arcing horn sangat mempengaruhi tegangan kritis pada isolator. Besarnya pentanahan juga mempengaruhi tegangan pada isplator. Ketika nilai tahanan pentanahan berada dibawah 5 ohm tegangan isolator tertinggi cenderung pada posisi middle sedangkan pada pentanahan besar dari 5 ohm, tegangan isolator tertinggi cenderung pada posisi lower. Tegangan pada isolator dihitung berdasarkan persamaan (2);

$$(V_{sn})_2 = (V_{pn})_2 - K_n(\tilde{V}_T)_2 \quad (2)$$

Tabel 5.2.c Pengaruh panjang gap arcing horn dan waktu lamanya flashover terhadap tegangan kritis isolator.

Tegangan Kritis Pada Isolator									
TIME	0.9 m	0.95 m	1 m	1.05 m	1.1 m	1.15 m	1.2 m	1.25 m	1.3 m
2	739.95	781.06	822.17	863.28	904.39	945.49	986.60	1027.71	1068.82
4	585.92	618.47	651.02	683.57	716.13	748.68	781.23	813.78	846.33
6	526.68	555.94	585.20	614.46	643.72	672.98	702.24	731.50	760.76
8	494.33	521.80	549.26	576.72	604.19	631.65	659.11	686.57	714.04
10	473.63	499.94	526.26	552.57	578.88	605.20	631.51	657.82	684.14
12	459.11	484.62	510.12	535.63	561.13	586.64	612.15	637.65	663.16
14	448.29	473.19	498.10	523.00	547.91	572.81	597.72	622.62	647.53
16	439.88	464.31	488.75	513.19	537.63	562.06	586.50	610.94	635.38

Tegangan Isolator (Volt)

Dengan memberikan toleransi 10 % dari BIL isolator yaitu 1.058.750 Volt (1,058 MV) maka dapa dilihat bahwa jarak optimal arcing horn dengan tegangan kritis isolator dalam keadaan kering yang mendekati nilai 1.089.000 volt (1,089 MV) yaitu pada saat panjang gap arcing horn 1.3 m. Saat isolator dalam keadaan basah, nilai tegangan

pada 1 keping isolator yaitu 45,38 kV dimana untuk 11 keping isolator didapatkan BIL isolator yaitu 499 kV. Untuk isolator dalam keadaan basah waktu flashover pada isolator lebih lama dibandingkan isolator dalam keadaan kering dengan jarak optimal arcing horn yang didapatkan dalam keadaan basah yaitu 0.9 m dengan waktu flashover lebih lama yaitu 8 μ s. Pada panjang jarak arcing horn 0.9 - 1m total kerusakan isolator yaitu 121 keping, sedangkan setelah setelah dilakukan perbaikan dengan jarak arcing horn 1.36 m, jumlah kerusakan pada isolator dapat berkurang menjadi 22 keping. Berarti dapat dikatakan bahwasanya flashover terjadi pada tingkat kelembaban isolator dibawah 60%. Penurunan tingkat flashover dibawah tingkat kelembaban 80% tidak menunjukkan pengaruh yang besar terhadap ketahanan tegangan isolator.

6. KESIMPULAN

Berdasarkan investigasi dari tingkat trip-out pada saluran transmisi 150 kV, pada saat panjang gap arcing horn 1.3 m sampai jarak 1.6 m, dengan memperhatikan nilai BIL isolator yaitu 1.21 MV. Dengan memberikan nilai toleransi sebesar 10% dari nilai BIL, maka didapatkan jarak optimal pada arcing horn untuk isolator kering yaitu 1.3 m dengan menggunakan pentanahan dibawah 5 ohm. Sedangkan untuk isolator dalam keadaan basah dengan BIL isolator yaitu 499 kV, maka didapatkan jarak optimal arcing horn yaitu 0.9 m. Berdasarkan nilai arcing horn yang dipasang 1.3 m, flashover dapat dikurangi dari 121 flashover/100 km/tahun menjadi 22 flashover/ 100 km/tahun. Berarti dapat dikatakan bahwasanya flashover terjadi pada tingkat kelembaban isolator dibawah 60%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Warmi and K. Michishita, "Investigation of Lightning Trip-out on 150 kV Transmission Line in West Sumatra," *IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering.*, vol. 11, Issue. 5, pp.671–673, September 2016. DOI:10.1002/tee.22286. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/tee.22286/full>
- [2] Yusreni, Warmi and Koji Michishita, "Investigation of Lightning Performance on 150 kV Transmission Line in West Sumatra", 9th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2015), 23 - 27 June 2015, Nagoya, Japan, pages (810-815).
- [3] Y. Warmi and K. Michishita, "Horn Length Estimation for Decrease of Trip-out Rates on 150 kV Transmission Line in West Sumatra in Indonesia," Joint Conference of The thenth International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV 2016) and 2016 Japan-

- Koroa Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering (JK 2016 on ED & HVE), ED-16-127, SP-16-056, HV-16-112, Miyazaki, Japan (2016.11.4). <https://ci.nii.ac.jp/naid/40021027830/>
- [4] Y. Warmi and K. Michishita, "Lightning Trip-Out of 150 kV Transmission Line: a Case Study," International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol 12, No 3, ISSN 1827 – 6660. <https://doi.org/10.15866/iree.v12i3.12233>
- [5] Y. Warmi and K. Michishita, "Tower-footing Resistance and Lightning Trip-outs of 150 KV Transmission Lines in West Sumatra in Indonesia," MATEC Web of Conferences 215, 01022 (2018) doi https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/74/mateconf_ictis2018_01022/mateconf_ictis2018_01022.html
- [6] Y. Warmi and K. Michishita, "Tower-footing Resistance and Lightning Trip-outs of 150 KV Transmission Lines in West Sumatra in Indonesia," MATEC Web of Conferences 215, 01022 (2018) doi https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/74/mateconf_ictis2018_01022/mateconf_ictis2018_01022.html
- [7] J. He, X. Wang, Z. Yu, and R. Zeng, "Statistical Analysis on Lightning Performance of Transmission Lines in Several Regions of China," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 3, pp. 1543–1551, 2014. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6924796/>
- [8] R. de la Rosa, G. Enriquez, and J. L. Bonilla, "Contributions to lightning research for transmission line compaction," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 3, no. 2, pp. 716 – 723, Apr. 1988.
- [9] I. M. Rawi and M. Z. A. A. Kadir, "Investigation on the 132kV overhead lines lightning- related flashovers in Malaysia," in *Proc. VIII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, Balneario Comboriu, Brazil, Oct 2015, pp. 239 – 243. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4310/>
- [10] Subcommittee for transmission lines, study committee a lightning risk, "Application Guide for Transmission Line Surge Arrester," CRIEPI Report H-07 2012 (in Japanese).
- [11] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, *IEEE Std 1243-1997*, pp. 1 – 44, Dec. 1997. <http://ieeexplore.ieee.org/document/640303/>
- [12] F. M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni, and F. Palone, "Tower Grounding Improvement vs. Line Surge Arresters: Comparison of Remedial Measures for High-BFOR Subtransmission Lines," *IEEE Trans. Ind. Apl.*, vol. 51, no. 6, pp. 4952 – 4960, June 2015. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7131509/>
- [13] S. Wu and W. Sun, "Back flashover protection performance analysis of 220kV double circuit transmission line," in *Proc. Asia-Pacific Conference Power and Energy Engineering, (APPEEC)*, Wuhan, Cina, March 2011, pp. 1 – 4. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5749070/>
- [14] A. Ametani and T. Kawamura, "A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 867–875, Apr. 2005. <http://ieeexplore.ieee.org/document/1413327/>
- [15] J. Sardi and M. Z. A. Ab Kadir, "Investigation on the effects of line parameters to the lightning performance of 132 kV Kuala Krai-Gua Musang transmission line," in *Proc. 7th International Symposium on Power Engineering and Optimization, (PEOCO)*, Langkawi, Malaysia, June 2013, pp. 594 – 599. http://ieeexplore.ieee.org/document/6564617/?d_enied
- [16] E. F. Koncel, "Potential of a Transmission-Line Tower Top When Struck by Lightning," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 75, no. 3, pp. 457 – 462, Jan. 1956. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4499327/>
- [17] A. Holdyk and B. Gustavsen, "Inclusion of Field Solver-Based Tower Footing Grounding Models in Electromagnetic Transients Programs," *IEEE Trans. Ind. Apl.*, vol. 51, no. 6, pp. 5101 – 5106, 2015. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7056439/>
- [18] IEEE Working group on Lightning Performance of Transmission Lines, "A simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, pp. 919 – 932, July 1985. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5528828/>
- [19] IEEE Working group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, "IEEE Working Group Report – Estimating Lightning Performance of Transmission Line II – Updates to Analytical Models," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. PWRD-8, no. 3, pp. 1254 – 1267, July 1993. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5528828/>
- [20] J.G. Anderson, "Lightning Performance of Transmission Line," *Transmission Line References Book 345 and Above*, California, 1982, pp. 545–597.
- [21] M. Darveniza, M. A. Aargent, G. J. Limbourn, Liew Ah Choy, R. O. Caldwell, J. R. Currie, B. C. Holcombe, R. H. Stillman, R. Frowd, "Modelling for lightning performance calculations," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-98, pp. 1900 – 1908, Dec. 1979.
- [22] D. Tanaka, T. Shindo, T. Miki, M. Miki, "Probability of concurrent flashover in a parallel gap configuration," *IEEJ Trans. Power & Energy*, vol. 11, pp. 669–674, 2015. DOI:10.1541/teejpes.135.669.