

초고압 SF₆ 가스 차단기의 실험적 차단성능 평가

정 영우*, 박 훈태, 오 일 성
LS산전 전력연구소

Performance Evaluation of a SF₆ Gas Circuit Breaker with Experimental Investigation

Y. W. Jeong*, H. T. Park, I. S. Oh
LS Industrial Systems, Electrotechnology R&D Center

Abstract - In this study, we build system and techniques of evaluating the interruption performance of the GCB with experimental method. We constructed a simplified synthetic test circuit of which ability is up to 245kV, 50kA BTF test. And We composed a model test circuit breaker with puffer assisted self blasting type GCB. With this circuit breaker, we carried out the experiment of no load and SLF90. During the tests, we measured the several factors such as stroke, pressure, arc temperature, the voltage and current near the current zero and dI/dt, dV/dt. Arc conductivity before 200ns before current zero which is one of the indexes of the thermal recovery of a GCB was measured. With these kinds of measurement, we could estimate the performance of a GCB fundamentally. Furthermore these results were used to adjust the arc modeling with CFD(computational fluid dynamics) and we could increase the plausibility of the analytical method.

1. 서 론

초고압 차단기 개발 시, 인증기관 등의 대전력 시험소에서 단락 차단시험을 실시하는 것은 필수적이지만 이것은 시간 및 경제적인 측면에서 매우 많은 비용을 지불해야 하며 그 결과도 특정 차단 책무에서의 차단 성공, 실패에 대한 정보만을 제시할 뿐이다. 또한 결과의 분포가 넓으므로 실제 차단성능의 한계를 알기도 쉽지 않다. 따라서, 차단기 개발 시 차단성능의 정확한 정보를 얻으려면 대단히 많은 횟수의 실험이 필요하다. 그러므로 새로운 차단기 개발 시 차단성능 평가는 설계에 매우 유용하다. 우리는 이러한 차단성능 평가를 쉽게 수행할 수 있는 간이합성시험설비를 구축하였고, 다양한 실험 및 측정정에 필요한 모델 SF₆ 가스 차단기를 제작하였다. 그리고 변위, 압력, 전압, 전류, 아크 온도 등을 정확히 측정할 수 있는 기술을 개발하였다. 이러한 기술은 대전류, 고전압, 고속 운동의 전자기계적 및 기계적으로 심한 노이즈 환경에서 작은 센서 신호를 정확하게 측정해야 하며, 수십 ms 동안에 이루어지는 차단현상에 대해서 충분한 시간 분해능을 가지고 측정해야 하므로 매우 어렵고, 많은 시행착오를 거쳤다. 이러한 측정을 통한 데이터는 실험적 차단성능 평가의 database로 축적될 뿐 아니라 아크 유동해석의 보정을 위한 데이터로 활용되어 아크 유동해석의 신뢰성을 향상시켜 설계 시 실험 횟수를 줄이고 최적설계에 도움을 주었다. 이외에 우리는 초고압 차단기의 열적 차단성능의 중요한 지표가 될 수 있는 전류영점 (Current Zero)에서의 전압 및 전류를 측정할 수 있는 시스템을 도입, 측정하였다. 이러한 실험을 통하여 축적된 결과로서 향후 차단성능 평가에 대한 기준을 자체적으로 제시할 수 있게 될 것이다.

2. 본 론

2.1 간이합성설비

차단기의 성능을 사내에서 평가할 수 있도록 간이합성설비를 구축하였다. 245kV 50kA GCB를 IEC 62271-100에 의하여 BTF 100s 실험을 수행할 수 있도록 설계하여 제작하였다. 전류원 커패시터 뱅크의 용량은 30,000uF이며, 보조차단기는 362kV 2절절 GCB를 사용하였다. 전압원 커패시터 뱅크는 2배압 방식으로 제작되었으며, 2-para BTF 회로로써 4-para BTF 과형을 근사화하여 실험할 수 있도록 설계하였다. 차단성능 평가 실험은 주로 SLF 실험을 중심으로 실시하였으며, BTF회로로써 SLF 실험 과형의 첫 번째 과형의 기울기만 (dV/dt) 수속 동안 모의하여 실험을 실시하였다.

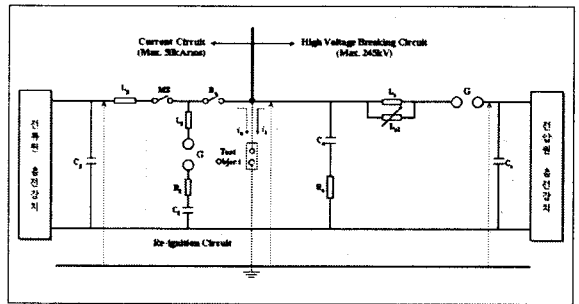


그림. 1 간이합성시험설비 회로도

2.2 모델 차단기 및 측정 시스템

모델 차단기로 단상 145kV 40kA 소호부와 유압 조작기를 연결하여 구성하였다. 차단기 내부를 볼 수 있도록 강화유리로 된 가시창을 점점 높이에 90° 간격으로 장착하여 아크 온도 계측시 활용하였다. 조작기의 이동을 측정하기 위하여 직선형 변위센서를(PZ34-A, Gefran) 유압 조작기 하단에 조작봉과 직렬이 되게 연결하였다. 고전압, 대전류 부근에서 전자기계적으로 간섭되는 것을 최소화하고 시간 지연이 없도록 하기위하여 가변저항형 센서를 적용하였다. 센서를 가동부에 연결시 진동이 전달되어 센서 접촉자에 의한 노이즈가 발생하지 않도록 지그를 설계하여야 하며, 유압조작기에 직결시는 오일의 누유 방지도 중요하다.

차단부의 차단과정은 아크에 의해 이온화된 hot 가스를 압력상승을 이용하여 cool 가스와 섞어 주므로, 압력상승이 차단성능의 매우 중요한 요소이다. 또한 압력 data는 CFD를 이용한 아크 모델링의 정확성을 검증하는 중요한 정보가 된다. 차단현상은 수십 ms의 매우 짧은 시간에 이루어지므로 정확한 압력 측정을 위해서는 응답속도가 매우 빠른 압력센서가 필요하다. 이러한 목적으로는 압전성 압력센서가 가장 적합하며, 본 연구에서는

압전성 압력센서(601A, Kistler)와 전하 증폭기(5011, Kistler)를 사용하여 압력을 측정하였고 만족할만한 결과를 얻었다. 이러한 압전성 압력센서에서 발생하는 전압은 매우 작으므로 차단 시험시의 고전압, 대전류 환경에서 좋은 측정결과를 얻으려면, 전자기 차폐와 접지간에 페루트가 형성되어 전류가 흐르는 것을 막아야 한다. 본 연구에서 압력센서 및 증폭기와 연결된 모든 부분의 접지를 모델 차단기의 접지와 분리하여 floating시켰으며, 전하 증폭기와 OSC 사이에는 optical isolator(Isobe 3000)를 사용하여 전기적으로 분리시켜서 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구를 진행하면서 팽창실, 압축실, 냉각통의 압력을 측정하였는데, 팽창실, 압축실은 비교적 깨끗한 파형을 얻을 수 있었으나, 냉각통은 열에 의한 압전소자의 노이즈가 커서 의미있는 파형을 얻을 수 없었다.

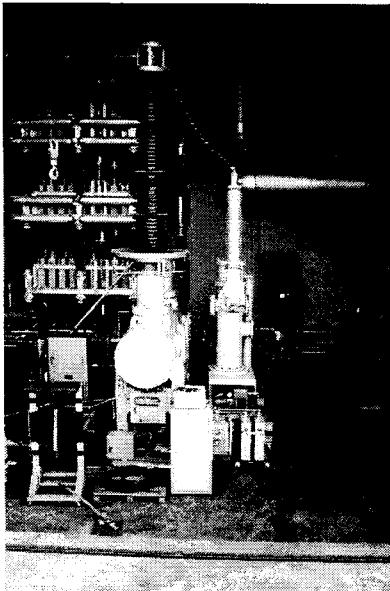


그림. 2 모델 차단기

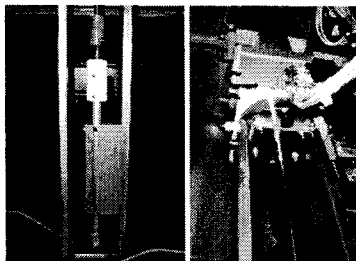


그림. 3 조각기 변위센서 및 지그

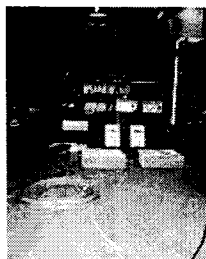


그림. 4 압력 측정 장비

차단기내 아크의 온도는 차단의 관점에서 중요한 요소가

되며 유동해석의 검증에 좋은 정보가 된다. 차단기내 아크의 온도는 매우 고온이며 탐침등을 쓰기에 곤란하여 분광학적 방법으로 측정하였다. Local Thermodynamic Equilibrium(LTE)라는 가정하에서 아크내에 존재하는 점점에서 증발된 Cu원소의 스펙트럼 선의 강도를 비교하여 Boltzmann Plot 방법으로 아크의 온도를 측정하였다. 온도는 스펙트럼 선의 upper level energy(E_u)와 그 강도의 차이에 의해서 주로 결정된다. 스펙트럼 선의 강도는 식(1), (2)로 나타내며, 두 점을 이은 직선의 기울기가 $1/T$ (온도, K) 이다. 식(1), (2)를 계산하기 위해서는 사용된 스펙트럼 선의 원자 정보가 필요하며 표. 1에 아크 온도 계산에 필요한 Cu의 원자 정보를 제시하였다.

$$I = N_0 \frac{hc g_n A_{nm}}{U(T) \lambda} \exp(-E/kT) \quad (1)$$

$$\log \frac{I \lambda}{g_n A_{nm}} = -\frac{0.434 E}{k T} + \log \frac{N_0 hc}{U(T)} \quad (2)$$

표. 1 Cu 스펙트럼 선의 원자 정보

| Element | λ (nm) | $\log(gf)$ | A_{ki} (s^{-1}) | g^n | E_u (eV) |
|---------|-------------------|------------|--------------------------|-------|---------------|
| Cu I | 510.5 | -1.505 | 2.0E+6 | 4 | 3.8169 |
| Cu I | 515.3 | -0.02 | 6.0E+7 | 4 | 6.1915 |

분광시스템은 quartz 광섬유 다발과 분광기(SP308, Acton, 1200 groove/mm) 및 ICCD (PI-Max 512RB, Princeton Inc.)로 구성되며 전체는 PC로 제어된다. 이러한 과정을 통해서 GCB 차단부의 아크 온도를 측정하였다. 아크가 노즐과 금속제 탱크에 둘러싸여 있고, 높은 압력의 SF6 가스로 충전되어 있으므로 아크의 빛을 획득하는 것이 어려워져 노즐에 작은 구멍을 뚫어서 그 구멍을 통해서 나오는 빛을 강화유리 가시창을 통해서 획득하여 아크 온도를 측정하였다. 이렇게 노즐에 구멍을 뚫은 조건과 실제 차단기의 조건은 다르지만 이런 시도 자체에도 의미는 있다. 본 연구에서 측정된 GCB내 아크의 온도는 전형적으로 약 20,000K으로써 기타 참고 문헌들에서 제시하는 온도와 유사한 수준을 나타내었다. 향후 좀더 정확한 위치와 시간에 아크의 빛을 획득할 수 있는 지그를 제작하여 정확한 온도 측정을 하고자 한다.

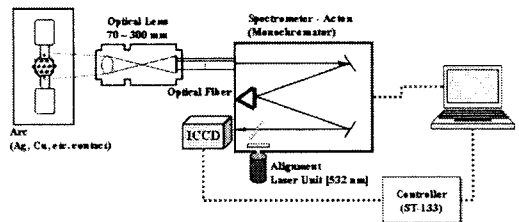


그림. 5 분광 온도측정시스템의 개략도

2.3 Current Zero Measurement(CZM) System

차단기가 대전류를 차단하는데 있어서 전류 영점은 매우 중요한 순간이다. 이 시점에 SF6 가스에 의해 아크 에너지를 강제적으로 소호하는 것은 차단 성공에 최적의 조건을 가지게 된다. 결정적인 전류 영점 기간은 수십 us 정도만 지속되며, 이 기간에 대한 물리적인 작용을 파악하는 것은 소호 성능의 평가에 직접적인 지표가 된다. 전류 영점의 초기 조건은 아크지속에서 전류 영점 전 상당히 긴 시점 전부터의 현상에 의해서 결정되어진다.[2]

특히 SLF 차단 특성은 전류 영점의 거동에 영향을 많이 받는다. 그러나 GCB에서 전류 영점에서의 정확한 계측은 매우 어렵다. 왜냐하면 전류 영점 부근 수백 us에서, 전류의 크기는 최대치의 1/100,000 정도이고 전압의 크기는 최대치의 1/100 정도이며, 여기에 stray 커패시턴스에 의한 값이 측정값을 변화시킨다. 본 연구에서는 KEMA에서 도입한 전류영점 측정시스템(CZM)을 사용하였으며, 시스템의 사양은 40MHz, 12bit의 시간 및 수직 분해능을 가지고 있고 측정을 위해서 특별하게 고안된 로고우스키 코일과 광케이블 연결구조를 가진다.

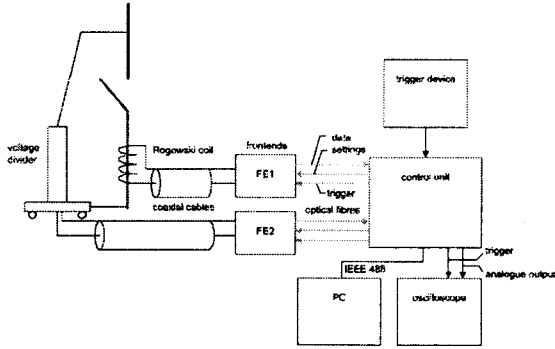


그림. 6 전류영점 측정 시스템 (CZM)

전류영점에서의 차단성능을 나타내는 지표로 저항(R)이나 도전률(G)를 많이 사용하는데 본 연구에서는 G를 사용하였다. 이론적으로는 전류영점인 순간의 G가 가장 좋은 지표가 되겠지만, 매우 작은 신호에 노이즈의 영향을 고려하여 전류영점 전 200ns의 G를 GCB의 차단 성공 및 실패 및 SLF 차단성능의 지표로 채택하였다. 일부 제조사에서는 전류영점 전 400 또는 500ns의 G값을 채택하고 있다.

표. 2 145kV 모델 차단기의 CZ 측정 데이터 일부

| Test No. | I [kA] | V _p [kV] | t _p [us] | Result [I/R] | T _{arc} [ms] | G(-200) [ms] |
|----------|--------|---------------------|---------------------|--------------|-----------------------|--------------|
| 1 | 36 | 20 | 3.06 | R | 12.77 | 5.62 |
| 2 | 36 | 10 | 3.06 | I | 13.37 | 1.37 |
| 3 | 36 | 10 | 3.06 | I | 12.1 | 2.9 |

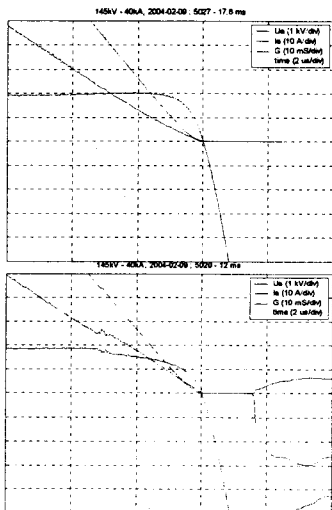


그림. 7 차단성공 및 실패시 G(-200) 파형

표. 2에 제시한 데이터는 145kV 모델 차단기의 차단시험에서 전류영점 현상을 측정된 일부 데이터이다. SLF TRV의 첫 번째 파형만을 간이합성설비에서 모의하여 인가하였다. 표. 2의 V_p 및 t_p는 첫 번째 침두 값과 그때까지의 시간을 의미한다. 결과로부터 차단 성공 및 실패시의 G(-200)값의 차이를 알 수 있다. 표. 2에 제시한 G(-200)값은 일반적인 상용 GCB의 G(-200)값과 비교하여 다소 높은 값인데, 이것은 아크온도를 측정하기 위해서 노즐에 미세한 구멍을 여러개 뚫어서 압력 누출이 발생했기 때문인 것으로 추정된다.

2.4 차단성능 평가 실험 - SLF

SLF는 1950년대에 발견된 비교적 근래의 고장유형이며, 차단기에서 매우 가까운 거리(수백m ~ 수km)에서 가공 송전선이 단락될 때 발생한다. 전원측의 완만한 기율기의 과도회복전압(TRV)에 중첩된 매우 빠른 기율기의 송전선 반사파 TRV가 아직 열적으로 회복되지 못한 상태의 차단기 극간에 인가되어 재발호를 발생시키는 것으로 회복전압 상승률(RRRV)은 3~10kV 정도이다. 이러한 SLF 차단성능에 관한 많은 연구가 진행되어 차단기가 차단할 수 있는 차단단계 회복전압 상승률(RRRVC)과 전류 스트레스, 압력과의 관계가 식(3)과 같음이 널리 알려져있다.

$$RRRV_c = K \cdot P^\alpha (dI/dt)^{-\beta} \quad (3)$$

여기서, K, α, β는 실험적으로 얻어지는 상수이다. Toshiba의 경우는 여러 규격의 실제품 차단기를 실험하여 각각 4.1, 2.68, 2.42의 값을 제시하기도 하였다. 이 상수의 결과에 따르면, 145kV 40kA 차단기의 경우 L90의 규격을 만족하려면 18.7[bar]의 압력이 필요하다. 향후 성능평가 실험의 반복을 통하여 LS산전에 맞는 상수를 도출하고자 한다.

본 연구에서는 단상 145kV 40kA 복합소호방식 모델 차단기에 대하여 dI/dt, dV/dt, 압력 등을 측정하며 차단 실험을 실시하였다. 그림. 8은 모델 차단기의 차단특성을 측정 한 한 예이다.

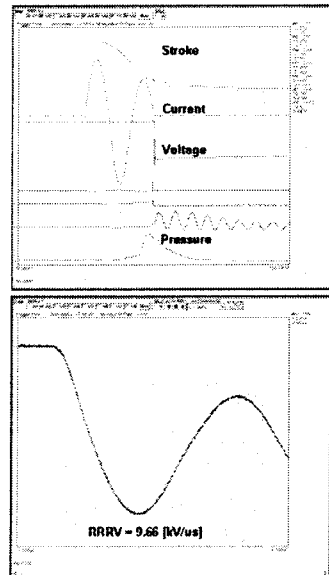


그림. 8 모델차단기 차단특성의 한 예 (dI/dt=19.2A/us, dV/dt=9.66kV/us, 아크시간=11.23ms, 팽창실 최대압력상승=19.38bar)

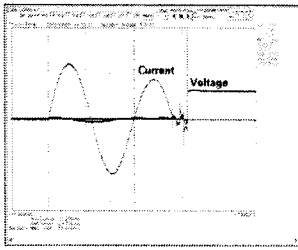


그림. 9 모델차단기 차단실패의 한 예

표. 3 모델 차단기의 실험결과

| Test No. | dI/dt [A/us] | dV/dt [kV/us] | Arcing Time[ms] | Pressure Rise[bar] | 결과 (I/R) |
|----------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|----------|
| 0 | 무부하 | 무부하 | - | 5.8 | - |
| 1 | 19.2 | 6.9 | 9.2 | 37.5 | I (O) |
| 2 | 9.6 | 9.7 | 9.2 | 8.3 | I (O) |
| 3 | 9.6 | 9.7 | 9.2 | 6.8 | R (X) |
| 4 | 19.2 | 9.7 | 11.2 | 19.4 | I (O) |
| 5 | 19.2 | 11.5 | 11.2 | 22.3 | I (O) |
| 6 | 19.2 | 9.41 | 11.2 | 24.8 | I (O) |
| 7 | 19.2 | 10.7 | 10.2 | - | I (O) |
| 8 | 19.2 | 10.15 | 9.2 | - | I (O) |

표. 3을 가지고 모델 차단기의 차단성능을 추정할 수 있다. 압력은 팽창실에서 측정된 압력으로, 무부하시의 압력 상승은 5.8 [bar]이며 모델 차단기에 복합소호방식을 채택함으로써 압축실에서 발생한 압력이 무부하시 팽창실에 전달되어 이러한 압력 상승을 가져왔다. 이것은 소전류에서도 차단성능을 확보할 수 있음을 의미한다. 이어서 40kA 정격단락전류의 90%에 해당하는 36kA를 차단한 1번 실험에서 37.5 [bar]의 압력 상승을 보이며 단락전류를 차단했다. 이어서 작은 전류의 차단성능을 확인하고자 18kA를 차단 실험한 2번, 3번 실험의 경우 압력상승이 각 8.3, 6.8 [bar]로써 낮은 값이 나오고 50%만 차단 성공하였다. 이것은 복합소호방식의 특성을 잘 보여주는 실험으로서 오히려 낮은 전류에 낮은 압력을 보여 dI/dt 스트레스는 1/2밖에 되지 않는 동일 dV/dt에서 오히려 차단하지 못하는 결과를 보였다. 복합소호방식이 아크에너지로서 노즐을 용삭시켜 그 증발가스의 압력을 이용하여 아크 소호에 사용하기 때문이며, 제품 개발시 L90, T100 등의 최대 전류 정격뿐 아니라 낮은 전류의 정격에 대해서도 충분한 차단성능을 확보하는 것이 필요함을 보여주는 실험결과이다.

이후 4번에서 8번의 실험까지 36kA를 차단한 실험은 모두 차단을 하였다. 이것은 L90의 차단성능은 충분히 확보가 되었음을 보여주는 것이다. 7번, 8번 실험에서는 압력센서의 파손으로 압력을 측정하지 못하였다. 최초 36kA 차단시 40 [bar]에 가까운 압력이 실험을 거듭할 수록 20 [bar] 정도까지 낮아진 것을 볼 수 있는데, 이것 또한 복합소호방식 차단기의 전형적인 특징으로써 노즐 용삭에 따른 압력저하를 보여주는 것이다. 따라서 차단 반복에 따라서 열화되어 정격을 차단할 수 없는 차단횟수가 있으므로 개발시 누적된 차단 에너지에 대한 열화 와 한계 수명을 검증하는 것도 필요하다고 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서 초고압 가스 차단기의 차단성능평가를 실험적으로 수행할 수 있는 간이합성시험설비를 구축하고, 각 차단성능평가 인자를 도출할 수 있는 계측기법을 확립하였다. 실험을 위하여 145kV 40kA 단상 복합소호식 모델 가스차단기를 설계, 제작하였고 이 차단기를 가지

고 기초적인 차단성능 평가 실험을 수행하였다. 강한 전자기적 노이즈 환경에서 정확한 계측을 위해서 여러 가지를 고려한 방법이 필요하였고, 아크 온도를 계측하는 시도를 통하여 여러 참고문헌에서 제시하는 Cu 전극 아크의 온도와 근사한 값을 측정할 수 있었다.

전류영점 측정을 통하여 차단기 성능평가의 좋은 지표가 되는 G(-200)값을 측정할 수 있었고, 좀 더 정확한 측정을 위하여 많은 횟수의 전류영점 측정과 분석이 필요할 것이다.

dI/dt와 dV/dt를 바꾸어 가면서 모델 차단기의 차단실험을 실시한 결과 압력에 따른 차단 성공/실패의 경향을 확인할 수 있었으며, 복합소호방식 차단기의 특성을 실험적으로 확인할 수 있었다. 압력이 또한 SLF 차단성능에 중요한 영향을 미침을 확인할 수 있었고 타 제조회사와 같이 자체적인 관계식의 상수 도출이 필요함을 알 수 있었다.

향후 구축된 간이합성설비와 계측 기법으로서 다양한 모델 차단기에 대하여 실험을 실시하고자 한다. CZM을 통하여서 전류영점에서의 차단 성공/실패에 관련한 정확한 기준치를 도출하고, dI/dt와 dV/dt를 가변하여 차단 성공/실패와 압력상승과의 관계식의 상수를 LS산전에 맞는 값을 도출하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Steffens, C. M. Franck, M. Seeger Basic Investigation on Resistance at Current Zero of SF6 selfblast Circuit Breakers. Proc. of the XVth International Conference on Gas Discharge., vol. 1, pp. 65-68, 2004.
- [2] R. P. P. Smeets, V. Kertész Performance Evaluation of High-Voltage Circuit Breakers by Means of Current Zero Analysis. IEEE Trans. on Power systems., pp. 424-429, 2002.
- [3] R. L. Kurucz and B. Bell "Atomic spectral line database from CD-ROM 23" 1995, Cambridge, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. <http://cfa-www.harvard.edu/amdata/ampdata/kurucz23/seku r.html>
- [4] D. R. Lide "Handbook of Chemistry and Physics", CRC press, pp. 10-103, 2003
- [5] U. Habedank Application of a New Arc Model for the Evaluation of Short-Circuit Breaking Tests, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, October, pp. 1921-1925, 1993