

고온·고압 아크 플라즈마 하에서의 정상상태 노즐용삭 해석 기술

論文

52C-9-5

Steady State Analysis of Nozzle Ablation Under High Temperature and High Pressure Arc Plasma

李秉潤*·宋基東*·鄭鎭敎*·朴敬燁***

(Byeong-Yoon Lee · Ki-Dong Song, Jin-Kyo Chong · Kyong-Yop Park)

Abstract - In this paper, physical phenomena which are related to the high temperature and high pressure arc plasma generated during the fault current interruption by SF₆ gas circuit breakers are reviewed. In particular, in order to analyze nozzle ablation induced by the heats transferred to the surface of the poly-tetrafluoroethylene(PTFE) nozzle through arc radiation, a governing equation for the calculation of PTFE concentration is added to the governing equations for SF₆ arc plasma analysis. The proposed method is applied to the steady state analysis of SF₆ arc plasma generated by direct current taking account of the nozzle ablation and the results are presented.

Key Words : arc plasma, current interruption, SF₆ gas circuit breaker, nozzle, ablation, PTFE concentration

1. 서론

SF₆ 가스는 높은 절연내력특성과 우수한 아크소호특성을 보유하고 있기 때문에 고전압 가스차단기에 널리 사용되고 있다[1]. 그런데 가스차단기의 동작책무에 따라, 계통에서 선로의 지락 또는 단락과 같은 고장이 발생하면 고장전류를 차단하는 과정에서 고온·고압의 SF₆ 아크 플라즈마가 발생하게 된다. 이 때, 발생한 아크 플라즈마 중심부의 온도는 25,000~30,000 K에 이르며, 가스의 압력은 수십 기압에 달하기도 한다.

가스차단기 내부에서 발생하는 아크 플라즈마와 관련된 물리적 현상들은 매우 복잡하여 현재까지도 모든 현상을 고려한 해석 기술은 개발되어 있지 않다. 먼저 고장전류에 의해 발생한 아크로부터 나오는 열에너지는 전도, 대류 및 복사와 같은 열전달 메카니즘에 의해 아크를 둘러싸고 있는 주위의 냉가스로 전달된다. 특히, 복사에 의해 노즐 표면에 전달된 열에너지는 Poly-TetraFluoroEthylene(PTFE : 사불화플라스틱)과 같은 노즐 물질의 용삭을 일으키며, 용삭된 물질은 SF₆ 가스에 혼합된다. 접점의 표면에서는 주울열과 아크에 의한 가열로 인해 접점의 재질이 증발되어 아크 플라즈마 내부로 녹아 들어간다. 접점의 팁(Tip)부분에서는 전극의 Sheath효과가 발생하고, 아크전류에 의해 발생한 자계에 의해 아크자체가 Lorentz힘을 받아 아크 플라즈마의 움직임에 영향을 미치게 된다. 그리고 아크 플라즈마가 존재하는 경우, 유동은 난류 특성을 띄게 된다.

이와 같이, 고장전류를 차단하는 과정에서 SF₆ 가스차단기 내부에서는 여러 가지 물리적 현상들이 복합적으로 발생하므로 이것들을 모두 고려한 아크 플라즈마 해석 기술을 개발하는 것은 매우 힘들다. 저자들은 90년대 말부터 상용화된 유동해석 프로그램인 Phoenics를 이용하여 아크 플라즈마를 해석하는 기술을 개발해오고 있는데, 현재까지는 위에서 열거한 현상들 가운데, 점점 재질의 증발효과와 전극의 Sheath 효과가 고려되고 있지 않다. 또한 노즐용삭의 경우도 고려되고는 있으나, 용삭된 노즐의 물리적 특성치들이 SF₆ 가스와 같다는 가정 하에서 해석하고 있다[2-4].

그런데 단자단락고장(Bus Terminal Fault) 또는 근거리 선로고장(Short Line Fault)과 같은 차단기의 대전류 차단 성능[5-8]에 용삭된 노즐 물질의 특성도 영향을 미친다는 연구결과[9,10]들이 다수 보고 되고 있다. 따라서 용삭된 노즐 물질과 SF₆ 가스의 물질 특성이 동일하다는 가정 하에 수행하고 있는 현재의 아크 플라즈마 해석 기술에 노즐의 실제적인 물질 특성을 반영하기 위한 노즐용삭 해석 기술을 추가한 아크 플라즈마 해석 기술의 개발이 요구되고 있다. 이러한 목적으로 노즐의 재질로 많이 사용되고 있는 PTFE와 SF₆ 가스의 혼합물질에 대한 물성치들을 PTFE의 농도에 따라 데이터베이스화하여 계산에 활용하였다. 또한 PTFE의 농도분포를 구하기 위해 지배방정식을 기존의 아크 플라즈마 해석을 위한 지배방정식에 추가하였으며, 직류 전류가 흐른다는 가정 하에서 SF₆ 가스차단부의 노즐형상에 대하여 정상상태의 열가스 유동해석을 수행하고 계산된 PTFE의 농도분포를 제시하였다.

* 正會員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 先任研究員

*** 正會員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 責任研究員

接受日字 : 2003年 5月 29日

最終完了 : 2003年 7月 28日

2. 노즐용삭 해석 기술

2.1 지배방정식

SF₆ 가스를 절연 및 소호 매체로 이용하는 가스차단기는

그 구조상, 차단부 내에서의 유동의 흐름은 축방향이 지배적이므로 반경방향의 유동 흐름을 무시하고 원통좌표계 (r, θ, z) 를 이용하여 아크 플라즈마를 해석하기 위한 과도상태 지배방정식을 표현하면 다음과 같이 된다.

· 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

여기서, ρ 는 PTFE-SF₆ 혼합물질의 밀도를 나타내며 U 는 가스의 속도벡터로 반경방향의 속도성분 v 와 축방향의 속도성분 w 로 구성된다.

· 반경방향 운동량 보존방정식

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho Uv) - \text{div}(\Gamma \text{grad } v) = -\frac{\partial P}{\partial r} + (\mathcal{J} \times \vec{B})_r \quad (2)$$

여기서 v 는 반경방향의 가스의 속도, 점성도 $\Gamma = \mu_r + \mu_t$ 이고, μ_r 과 μ_t 는 각각 가스의 층류 점성도 및 난류 점성도를 나타낸다. \mathcal{J} 는 전류밀도벡터, \vec{B} 는 자속밀도를 나타내는 벡터이며, P 는 압력이다.

· 축방향 운동량 보존방정식

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho Uw) - \text{div}(\Gamma \text{grad } w) = -\frac{\partial P}{\partial z} + (\mathcal{J} \times \vec{B})_z \quad (3)$$

여기서 w 는 축방향으로의 가스의 속도를 나타낸다.

· 에너지 보존방정식

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \text{div}(\rho Uh) - \text{div}(\Gamma_h \text{grad } h) = -\frac{\partial P}{\partial t} + \sigma E^2 - q + \Phi \quad (4)$$

여기에서 h 는 엔탈피를 나타내며, $\Gamma_h = (k_r + k_t)/C_p$ 로 주어진다. k_r 과 k_t 는 각각 가스의 층류 열전도도 및 난류 열전도도를 나타내고 C_p 는 가스의 비열이다. q 와 σE^2 은 각각 아크 방사에 의한 에너지 손실과 주울 손실을 나타내며 σ 는 가스의 전기전도도, E 는 전계의 세기이다. 또한 Φ 는 층류와 난류 점성도에 의한 에너지 소산량을 나타내지만 그 영향이 미미하여 실제 계산에서는 무시되었다.

· PTFE 농도 방정식

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \text{div}(\rho UC) - \text{div}(\Gamma_C \text{grad } C) = 0 \quad (5)$$

여기에서 C 는 PTFE의 농도, $\Gamma_C = \rho(D_t + D_l)$ 을 각각 나타내며, D_t 는 혼합물질의 층류확산계수를, D_l 는 난류확산계수가

다. 난류확산계수 D_l 는 난류점성도 μ_t 와 다음의 관계에 있다.

$$D_l = \frac{\mu_t}{\rho S c_t} \quad (6)$$

여기에서 $S c_t$ 는 Schmidt수로 무차원의 값이며 그 값이 대개 1.0 근처라고 보고 되어 있어 본 논문에서도 이 값으로 적용하였다[9].

위에서 과도상태 노즐용사를 해석하기 위한 지배방정식들을 제시하였는데 정상상태 노즐용사의 경우에는 각 지배방정식에서 시간과 관련된 항들을 0으로 두고 해석하면 된다.

2.2 아크의 방사모델링

전류의 차단과정에서 발생한 아크의 방사에 의한 열전달을 그림 1과 같이 근사적으로 모의하였다. 이 모델에 의하면 아크의 중심부($0 \leq r \leq R_1$)로부터 방사된 에너지의 일부가 흡수층($R_1 \leq r \leq R_2$)에서 흡수되고 나머지가 노즐에 도달하게 된다. 노즐에 도달한 방사에너지 가운데 일부는 노즐용사에 기여하고 나머지는 손실되는 것으로 가정하였다. 이 모델에 따라 방사에너지를 구하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

- ① 최대 온도 T_m 탐색
- ② 아크에너지 흡수층의 경계 R_1 과 R_2 탐색
- ③ 아크의 방사 반경 설정
- ④ 아크의 방사계수 q_a 를 계산하고 이를 적분하여 총 방사 에너지를 계산
- ⑤ 아크의 흡수계수 q_a 와 최대흡수계수 q_0 사이의 다음 관계식이 성립한다고 가정

$$\frac{q_a(r)}{q_0} = A - \left(\frac{R_1 + R_2 - 2r}{R_2 - R_1} \right)^2$$

단, A 는 상수

- ⑥ q_0 를 결정하고, 식 으로부터 q_a 를 계산

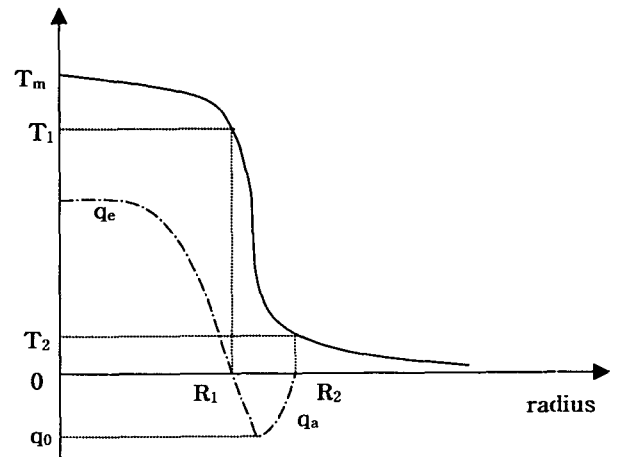


그림 1 아크의 방사에너지 모델
Fig. 1 Radiation Energy Model of Arc Plasma

2.3 난류모델

기존에 발표된 논문에 의하면 SF₆ 가스차단부에서 발생하는 아크 플라즈마의 해석에서는 난류모델로 식(7)과 같은 Prandtl의 혼합거리모델이 적합하다고 보고 되어 있어 본 논문에서도 이 모델을 사용하였다[11].

$$\mu_t = \rho (c_1 \delta)^2 \left| \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right| \quad (7)$$

여기에서, c₁은 난류상수 파라미터이며, δ는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta = \sqrt{\int_0^{R_{2k}} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{2k}}\right) 2r dr} \quad (8)$$

단, R_{2k}와 ρ_{2k}는 각각 아크의 온도가 2,000 [K]가 되는 지점의 반경 및 가스 밀도이다. 이것은 SF₆와 PTFE 혼합가스의 경우 약 2,000 [K] 이상에서부터 전기전도도가 0보다 큰 값이 되어 아크 전류가 흐르게 되므로 이 온도를 기준으로 크게 아크영역과 냉가스 영역으로 분리되게 되기 때문이다.

2.4 전계 및 자계 계산

전류의 차단과정에서 가스를 통해 흐르는 고장 전류에 의해 열이 발생한다. 이 열원은 주울의 법칙에 따라 σE²으로 표현되어 에너지 보존방정식 (4)에서 포함되어 있으며 열원을 계산하기 위해서는 전계분포를 해석해야 한다.

먼저 차단기 내부에서의 전류의 연속방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (9)$$

여기에서 J는 전류밀도로 오옴의 법칙에 따라 도전 매질 내에서 다음의 관계가 성립한다.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (10)$$

여기서 σ는 전기전도도, E는 전계의 세기이다. 전계의 세기는 다시 스칼라 함수 φ에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (11)$$

따라서 가스 내에서의 전류분포를 나타내는 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (12)$$

경계조건으로는 양극과 음극부분에는 Dirichlet 조건을 그리는 Neumann 조건을 설정한다. 위와 같이 전위분포를 구한 결과를 이용하여 전계분포를 계산할 수 있다.

또한 아크전류에 의해 발생한 자계는 아크 자체에 Lorentz 힘을 작용시켜 유동의 흐름에 영향을 미치게 되는데 이것은 운동량 보존방정식 (2) 및 (3)에 (J×B), 와 (J×B)_r항으로 포함되어 있다. 아크 전류에 의해 유도된 자계는 아크의 축대칭 특성으로 인해 원주방향의 성분만을 갖게 된다. 따라서 아크의 투자율이 μ₀로 일정하다고 가정하면 자계는 식(13)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$B = \frac{\mu_0 \int_0^r J_z 2\pi \xi d\xi}{2\pi r} \quad (13)$$

여기에서 J_z는 전류밀도의 축 방향 성분이며 위에서 구한 전계로부터 식(10)을 이용하여 구하면 된다.

2.5 노즐용삭 모델링

PTFE의 농도계산을 위한 경계조건을 설정하는 방법을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 노즐 표면에서는 노즐에 도달한 방사에너지의 90%가 PTFE 물질을 용삭시키는데 이용된다고 가정하였다. 노즐용삭에 의한 노즐 직경의 변화는 매우 작기 때문에 노즐용삭에 의한 노즐 구조의 변화는 무시하였다. 노즐 표면에서의 PTFE 증기의 Mass Flux(단위면적당 단위시간당 질량) M_f는 다음과 같이 구했다.

$$M_f = \frac{R_f}{H_{PTFE}} \quad (14)$$

여기에서, R_f는 노즐 표면에서 용삭에 이용된 Radiation Flux를 나타내고, H_{PTFE}는 PTFE를 1 [kg] 증발시키는데 필요한 유효 증발에너지로 1.1 × 10⁷ [J/kg]로 주어지므로 이 값을 적용하였다.

따라서 PTFE의 농도를 해석하기 위한 노즐 표면에서의 경계조건을 살펴보면, 먼저 노즐 표면에서 용삭에 의해 유입되는 PTFE 증기의 Mass Flux는 위 식(14)에서 주어진 바와 같이 노즐에 바로 인접한 격자에 고려해 주었다. 그리고 PTFE 증기는 노즐 표면에서 수직으로 흘러나와 대류와 확산을 통해 열가스 유동 속으로 침투해가므로 반경 방향으로의 운동량은 다음과 같이 고려해 주었다.

$$F_c = \frac{M_f^2}{\rho_1 P} \quad (15)$$

여기에서 ρ₁은 1기압에서의 밀도, P는 노즐과 인접한 격자에서의 국부적인 압력이다. 한편, 위에서 언급한 바와 같이 PTFE 증기는 노즐 표면에서 수직으로 흘러나오므로 축 방향으로 운동량은 0으로 설정하였다. 그리고 엔탈피의 경우는 다음과 같이 고려해 주면된다.

$$F_h = M_f H_{PTFE} \quad (16)$$

마지막으로, 노즐의 상류장측 경계에서는 순수한 SF₆가스가 흘러들어오므로 PTFE 증기의 농도를 0.0으로 설정했으며 하류장측 경계에서는 Neumann조건을 설정하였다.

일단 PTFE 증기의 농도가 계산되면 농도에 따라 온도, 압력, 밀도, 전기전도도, 열전도도, 마하수 등의 각종 물질 특성치들을 평가하여 아크 플라즈마 해석을 실시하였다.

3. 노즐용삭 해석 사례

본 논문에서 소개한 노즐용삭 해석 기술을 그림 2에 보인 것과 같은 노즐 모델에 대하여 일정한 값의 직류전류가 흐른다는 가정 하에서 정상상태해석을 시도해 보았다. 노즐의 길이는 34.8 [mm]이고 상류장 전극의 직경은 10 [mm], 상류장 전극 Tip부분의 직경은 4.8 [mm]이다. 또한 하류장 전극의 직경은 6 [mm], 하류장 전극의 Tip부분의 직경은 4 [mm]이고, 입력부의 노즐 직경은 36 [mm], 출력부의 노즐 직경은 16 [mm]이다. 두 전극은 고정되어 있으며 전류는 2,000 [A] 직류 전류가 흐른다고 가정하였다. 일반적으로 차단부내에서의 압력은 수 기압에서 수십 기압으로 분포되므로, 입력부에서의 압력조건은 0.9 [MPa]의 Stagnation 상태를 가정하였고 출력부에서의 압력조건은 0.3 [MPa]로 가정하였다. 격자수는 축 방향으로 82개, 반경 방향으로 162개를 사용하여 해석영역을 분할하였다.

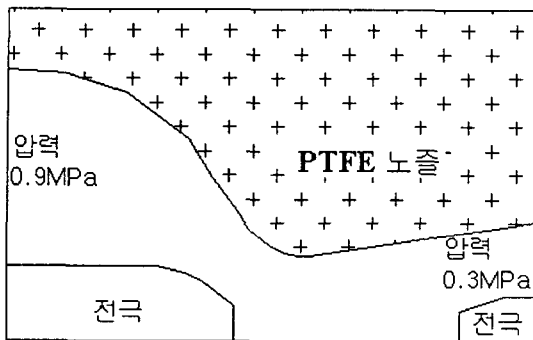


그림 2 차단부 노즐형상
Fig. 2 Geometry of Interrupter

아크 플라즈마는 자체해석을 수행하여 구한 Lorentz 힘이 아크에 미치는 영향을 운동량 보존방정식에서, 아크전류에 의한 발생한 주열 열과 복사에 의한 열손실을 에너지 보존방정식에서 각각 고려하여 해석하였고, SF₆-PTFE의 혼합물질의 농도계산을 실시하여 노즐용삭에 의한 영향도 고려하였다. 난류모델로는 Prandtl Mixing Length모델을 이용하였으며 난류상수 파라미터 c_1 은 0.195를 적용하였다. 본래 난류상수 파라미터는 노즐의 형상과 관련된 것으로 시험을 통해 얻은 결과와 해석결과를 비교하여 결정된다. 즉, 주어진 형상에 대하여는 전류의 크기나 기타 조건에 관계없이 아크 플라즈마 해석에 일정하게 사용되는 값이다. 본 논문에서는 유사 연구결과를 참조하여 이 값을 적용하였으나, 향후 이에 대한 연구도 진행할 예정이다.

그림 3에는 직류 전류 2,000 [A]가 흐르고 있다고 가정하여 노즐용삭 해석기술을 적용하여 아크 플라즈마를 해석한

결과로 아크 플라즈마가 정상상태에 도달했을 때의 온도분포를 도시한 것이다. 아크 플라즈마의 최대온도는 중심부에서 발생하고 있으며 약 23,000 [K]임을 알 수 있었다. 마지막으로 그림 4는 노즐용삭 해석기술을 이용한 농도계산으로부터 구한 PTFE의 정상상태에서의 농도분포를 도시한 것으로 PTFE의 농도가 최대 약 2.3 [%]임을 알 수 있다. 일반적으로 고장전류의 크기는 수십 kA에 달하므로 이 경우에는 보다 많은 PTFE 증기가 SF₆가스 중에 혼입될 것으로 판단되며 이미 발표된 논문들에서 언급한 바와 같이 차단기의 차단성능에도 크게 영향을 미칠 것으로 사료된다.

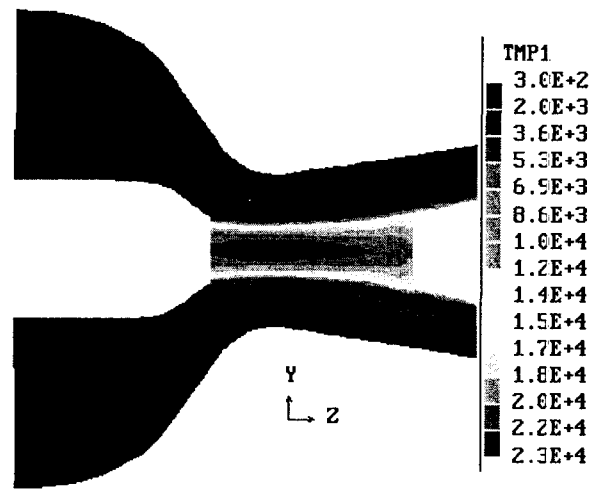


그림 3 온도분포도
Fig. 3 Temperature distribution (DC current 2,000[A])

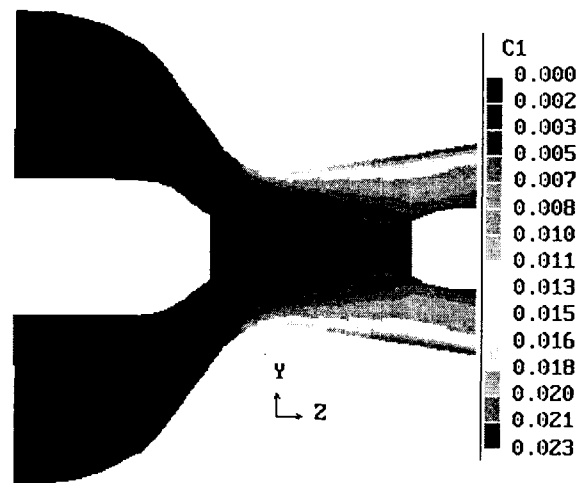


그림 4 농도분포도
Fig. 4 Concentration distribution (DC current 2,000[A])

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 아크 플라즈마를 해석하기 위한 지배방정식에 PTFE의 농도계산을 위한 지배방정식을 추가한

노즐용삭을 고려한 아크 플라즈마 해석 기술을 소개하고, 이것을 직류 전류가 흐른다는 가정 하에서 SF₆ 가스차단기의 노즐도넬에 대하여 정상상태 아크 플라즈마 해석에 적용하여 보았다. 그 결과 정상상태 하에서의 PTFE의 농도분포를 얻을 수 있었다. PTFE의 농도계산에 의한 SF₆-PTFE의 혼합 물질의 특성을 고려할 수 있게 됨으로써 기존의 아크 플라즈마 해석 기술을 보다 개선시킬 수 있는 계기를 마련하게 되었다.

향후, PTFE의 농도계산기법을 고장전류를 차단하는 과정에서 과도상태에 적용하여 노즐용삭에 의한 SF₆-PTFE의 물질 특성이 아크 플라즈마의 특성 및 SF₆ 가스차단기의 RRRV(Rate of Rise of Recovery Voltage)에 어떻게 영향을 미치는가에 대한 연구를 지속적으로 수행해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

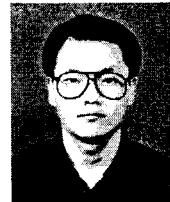
- [1] H.M. Ryan & G.R. Jones, "SF6 Switchgear", Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1989
- [2] 이병윤, 송기동, 박경엽, "초고압 가스차단부의 유부하 압력상승계산", 대한전기학회 전기기기연구회 합동춘계 학술대회 논문집, 1999, pp.52-54
- [3] 이병윤, 송기동, 박경엽, "초고압 가스차단부의 아크해석", 방전/플라즈마 춘계학술대회, 2000, pp.64-67
- [4] 이병윤, 송기동, 박경엽, 신영준, "복합소호방식 가스차단기의 대전류 차단특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 국제연구기관 특별 Session 논문집, 2000, pp. 37-40
- [5] "가스遮断器のユニット大容量化への 要求とその 基本技術", 일본전기학회기술보고, 제497호
- [6] M. Sakaki 외 3인, "GIS의遮断性能技術", 明電時報, 通巻232号, 1993, No.5, pp.13-24
- [7] "大容量遮断器の特殊遮断條件", 일본전기학회기술보고,(II부) 제388호
- [8] K. Ragaller, "Current Interruption in High-Voltage Networks", 1978, Plenum Press, New York, pp.29-65
- [9] J.D. Yan, J.L.Zhang, A.B. Murphy, W.B.Hall, M.T.C. Fang, "Arc Behavior in the Mixture of SF6 and PTFE Vapour in an AUTO-EXPANSION Circuit Breaker", Proceedings of the XIII International Conference on Gas Discharges and their Applicatios, 2000, pp.58-61
- [10] Khokan C. Paul, Tadahiro Sakuta, Takeshi Takashima, "Transport and Thermodynamic Properties of SF6 Gas Contaminated by PTFE Reinforced with Al2O3 and BN Particles", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 25, No. 4, August 1997 pp. 786-798
- [11] J. D. Yan, K. I. Nuttall and M. T. C. Fang, "A comparative study of turbulence models for SF6 arcs in a supersonic nozzle", J.Phys. D: Appl. Phys. 32(1999) pp.1401-1406

저 자 소 개



이 병 윤 (李 秉 潤)

1967년 11월 9일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 졸업(석사). 1997년 동대학원 졸업(공학박). 1996년 2월~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원. Tel: 055-280-1565, Fax: 055-280-1589 E-mail : bylee@keri.re.kr



송 기 동 (宋 基 東)

1963년 7월 5일생. 1988년 인하대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 2월 부산대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년 3월 현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원. Tel:055-280-1563, Fax:055-280-1589 E-mail: kdsong@keri.re.kr



정 진 교 (鄭 鎭 敎)

1967년 10월 18일생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 강원대 공대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 선임연구원. Tel:(055)280-1564, Fax:(055) 280-1589 E-mail : jkchong@keri.re.kr



박 경 엽 (朴 敬 燁)

1957년 1월 3일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영국 Liverpool 대학 전기공학과 졸업(공학박). 1978년 12월~1981년 5월 효성중공업(주) 전장설계부. 1981년 6월~현재 한국전기연구소 산업전기연구단 신전력기기연구그룹 그룹장(책임연구원). Tel: 0551-280-1561, Fax: 055-280-1589 E-mail : kypark@keri.re.kr