회전기내 부분방전 검출을 위한 마이크로스트립 라인 센서

채수정*, 김용주**, 강노원*, 강동식**, 정현교*
*서울대학교, **한국 전기연구원

Microstrip Line Sensor of Partial Discharge for Rotating Machine

Soo-Jeong Chae*, Yong_Joo Kim**, No-Weon Kang*, Dong-Sik Kang**, and Hyun-Kyo Jung*
*Seoul NationaUniversity, **Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 부분방전시험은 고전압 고정자 권선의 절연상태를 검사, 평가 할 수 있는 중요한 수단이다. 전동기와 발전기에서 일어나는 절연 악화의 징후로써 부분방전이 발생되며, 이러한 부분방전 신호를 검출하기 위한 센서로 SSC(Stator Slot Couple)를 사용한다. 하지만 현재 사용되고 있는 대부분의 SSC의 경우 설계에 있어 특성 임피던스가 실제구조에서 정확히 고려되지 않는 경향이 있다. 실제로 고정자 슬롯에 부착된 마이크로스트립 센서의 특성 임피던스는 정확히 50옴으로 정합 되지 않으며 이것은 센서의 성능에 중요한 영향을 미치게 된다. 그러므로 본 논문에서는 부분방전 센서의 성능을 개선시키기 위해 결합 전송선로(Coupled transmission line)를 이용한 임피던스 정합회로를 제안하고자 한다. 제안된 센서의 성능을 입증하기 위하여 고정자 슬롯에 설치된 기존의 SSC와 임피던스 정합회로를 부착한 센서를 시뮬레이션 한 후 비교 분석하였다. 결과적으로 제안된 정합 회로는 광대역 임피던스 정합 특성을 가지며 임피던스 부정합 때문에 일어나는 기존 SSC의 성능 악화를 개선할 수 있었다.

1. 서 론

부분방전은 고전압 기기의 절연 파괴 때문에 생기는 현상이며 시스템의 예방 진단에 사용된다. 부분방전 펄스는 순간적인 펄스 상승시간과 폭을 가지는 현상이며 운전중인 고전압 기기에서 부분방전 펄스 검출을 통해 고정자 권선의 절연 파괴를 진단할 수 있다.

SSC는 터빈 발전기와 고전압 회전기기의 부분방전 검출을 위한 센서로서 H.G Sedding에 의해 제안 되었다 [1,2]. 센서의 구조는 기본적으로 마이크로스트립 라인이며 전자기적 노이즈와 부분방전에 의한 펄스를 효과적으로 구별해 낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. SSC는 권선에 직접 연결되지 않으며 부분방전 펄스의 전자기적에너지를 검출하는 10MHz - 1GHz의 대역폭을 갖는 안테나로서 동작한다. 시간 영역에서의 부분방전 펄스를 모의 실험하기 위해 등가회로 모델을 사용할 수 있지만 그것만으론 부분방전 펄스의 복잡한 전파 현상을 고려해줄 수 없다. 그래서 시간영역 유한차분법(Finite Difference Time Domain method)나 MoM(Method of Mement)등을 이용한 수치해석 방법이 적용되고 있으며 본 논문에서는 이러한 수치해석에 기반을 둔 Fidelity사의 MoM 상용프로그램과 3차원 모의실험을 위한 상용프로그램인 CST(Computer Simulation Technology)를 사용하였다.

종래의 많은 실험에서 SSC의 특성 임피던스 측정은 그 자체 마이크로스트립 구조에서만 이루어 졌으나 실제 고전압 회전기기에 부착된 부분방전 센서는 그 특성임피던스가 기기의 구조에 따라 변하게 된다. 본 논문에서는 실제 부착된 부분방전 센서의 특성 임피던스를 모의 측정하고, 정합되지 않는 센서를 개선시킬 방안으로 결합선로 이론을 바탕으로 한 간단한 구조의 정합회로를 제안하였다.

2. 본 론

2.1 기본설계조건

마이크로스트립 라인에 정합회로를 부착할 경우 고려해야 할 사항이 몇 가지 있다. 첫째, 정합 회로는 부분방전 펄스의 영향을 받지 않아야한다. 둘째, 마이크로스트립은 두개의 포트를 가지는 수동소자인데 한쪽은 정합회로를 설치해 임피던스를 정합 시킬 수 있지만 다른 한쪽은 슬롯길이의 제약으로 인한 센서의 규격 때문에 정합회로 설치가 어렵다. 이러한 제약조건을 만족하기 위해 마이크로스트립을 위한 정합회로는 슬롯 바깥위치에 설치해야하며 다른 한쪽의 임피던스를 정합시기키 위해서 칩 저항을 그림 1과 같이 부착해야한다. 또한 슬롯구조의 규격으로 인해 정합회로의 폭도 제한되므로 이와 같은 조건을 만족하는 간단한 구조의 정합회로를 설계해야 한다.

2.2 정합회로 설계

2.2.1 마이크로스트립 센서의 특성임피던스

그림 2는 회전기 내 고정자 슬롯의 구조를 보여준다. 마이크로스트립 자체만을 고려해 볼 때 마이크로스트립 라인 위의 매질은 공기이지만 실제 슬롯에 부착된 센서는 윗부분이 wedge로 되어 있다. 고정자 권선은 Nomax와 반도체 유전물질(semi-conductive insulation meteri al)로 절연되고 그 위에 wedge가 위치해 있다. 이 경우 마이

크로스트립 라인의 특성임피던스는 wedge의 유전율과 절연물질의 영향을 받아 변하게 된다. 측정 장비의 특성임피던스를 50Ω 이라 했을 때 마이크로스트립에서는 임피던스 부정합이 일어나게 되고 이 부정합을 개선시키기 위해 정합 회로가 필요하다. 이러한 정합 회로를 작은 고전압 기기에 설치하기 위해서 그 크기는 설계조건을 만족할 만큼 충분히 작아야한다.

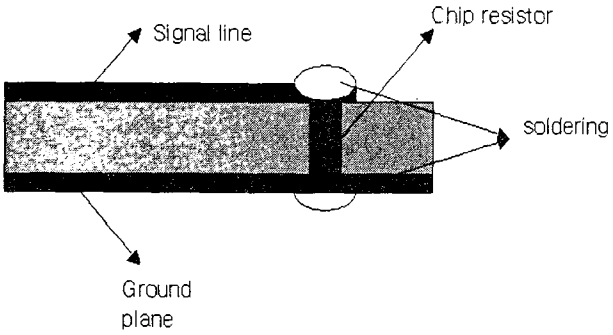

그림 1. 칩 저항을 이용한 포트 정합

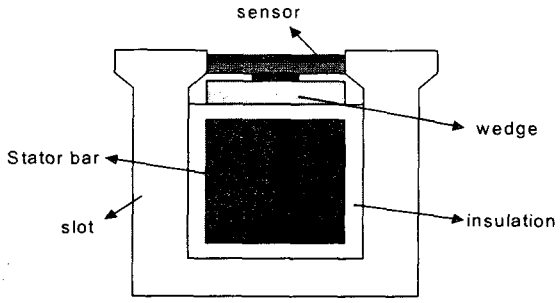

그림 2. 모터 슬롯에 부착된 SSC

실제 상황에 맞는 마이크로스트립 라인 센서를 고려하기 위해 그림 3(b)모델을 고려하였으며 비교대상으로 그림 3(a)를 정하였다. 마이크로스트립 라인의 고려해야 할 변수는 다음과 같다. 유전체 기판의 높이 h=0.787mm, 비유전율 $\epsilon_r = 4.6$,wedge의 두께 Wt= 0.7mm, wedge의 비유전율 2.3, 도전율 8×10^{-5} $[\mho/mm^2]$ 인 반도체 물질 그리고 절연 물질 두께 Et = 0.5mm, 절연 물질 비유전율 2.5이다. 마이크로스트립 자체(그림 3(a))의 특성임피던스는 50Ω 으로 제작하였으며 마이크로스트립 신호라인의 두께는 18um, 폭은 1.4mm.이다.

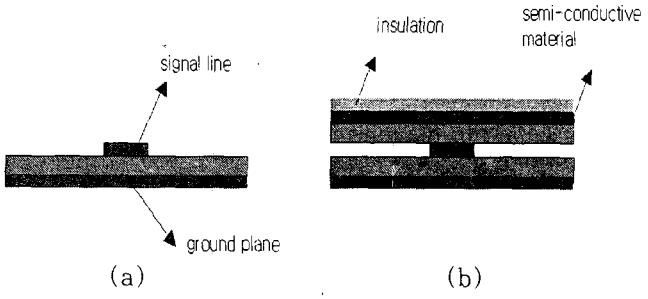

그림 3. (a) 공기 중에 위치한 마이크로스트립 라인
(b) 회전기기의 절연물질을 고려한 마이크로스트립 라인

모의 실험결과 그림 3(b)의 실제 상황과 유사한 마이크로스트립 라인의 특성임피던스는 45Ω 이었다. 이러한 부정합은 반사파를 발생시키며 센서의 감지능력을 저하시키므로 정합회로 설계가 필요하다.

2.2.2 결합전송선로를 이용한 정합회로 설계

전송선로를 이용한 소형화된 임피던스 변환기는 비대칭으로 결합된 TEM 선로의 정전용량의 분포를 고려한 몇 가지 데이터를 통해 Cristal에 의해 소개 되었다[7]. 최근에는 λ/4 변환기를 이용한 비대칭 결합 선로가 쓰이고 있다. 본 논문에서는 λ/4 변환기에 비해 더 작은 크기의 정합회로를 사용하였다[8]. 정합 회로의 설계기준은 고정자 슬롯의 크기에 영향을 크게 받으므로 이 같은 조건을 만족하는 작은 크기의 정합회로로 구부러진 형태의 결합선로를 사용하였다. 이 정합회로의 변수들은 최적화 기법을 통해 선택하였다. 그림 4는 2차원 2단 변환기를 보여주며 그림 5는 제안된 정합 회로를 보여주고 있다.

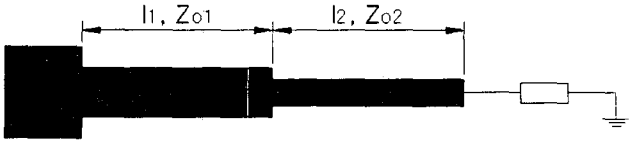

그림 4. 2단 λ/4 마이크로스트립 변환기

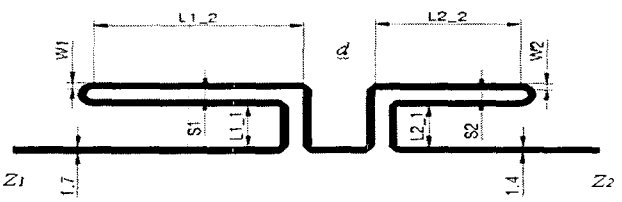

그림 5. 결합 전송선로를 이용한 제안된 정합회로

표 1은 최적화를 이용해 찾아낸 마이크로 스트립 변환기의 설계 변수를 보여주고 있다. 이 경우 부착되어질 마이크로 스트립 센서와 구조를 같게 하기 위해 정합 회로의 유전체 두께는 h=0.787mm, 비

유전율 $\epsilon_r = 4.6$,도체의 두께 t=18um, 그리고 coupling effect를 줄이기 위해 L_{1-1}, L_{2-1} 를 10mm으로 정하였다.

표 1. 정합회로 변수

	Initial value [mm]	Optimized value [mm]
L1_2	12	38.6
W1	1.2	1.54
S1	0.28	2.72
L2_2	25	26.94
W2	0.69	1.48
S2	0.53	2.69

그림 6에서는 특성임피던스가 45Ω , 50Ω 인 두개의 마이크로스트립 라인을 연결시킨 후 S 파라미터를 측정한 결과와 위에서 제안한 정합회로를 부착한 후 정합회로 양끝에 두 마이크로스트립을 연결시킨 결과를 비교하였다. 모의실험 결과 정합회로를 설치한 쪽의 S_{11} 이 0.4GHz에서 7dB가량 낮아짐을 볼 수 있고 반사가 더 적게 일어남을 알 수 있었다. 마이크로스트립 센서의 한쪽 부분은 정합회로를 연결하고 다른 한쪽은 그림 1와같이 칩 저항을 이용해 정합 하였다.

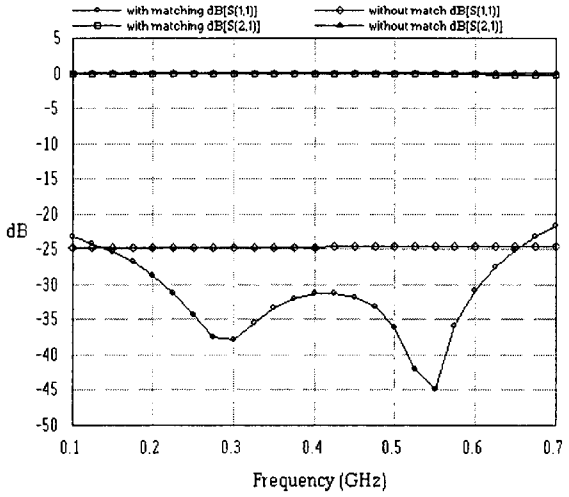

그림 6. 정합회로와 부정합 회로의 S파라미터 비교
45Ω , 50Ω 마이크로스트립 라인이 결합

2.3 부분방전 모의실험

마이크로스트립 센서를 wedge위에 길이 30Cm, 유전체 기판의 두께 0.787mm로 설계해 설치하였다. 마이크로스트립 라인의 폭은 고정자 슬롯과 같게 하고 센서의 유전체 기판은 비유전율 $\epsilon_r = 4.6$ 인 FR-4로 정하였다. 가상의 PD신호를 발생시키기 위해 고정자 권선과 슬롯사이에 가우시안펄스를 인가한 후 정합회로를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교 분석하였다. 분석 결과 그림 7,8에서와 같이 정합회로에 의해 센서의 성능이 개선됨을 알 수 있다.

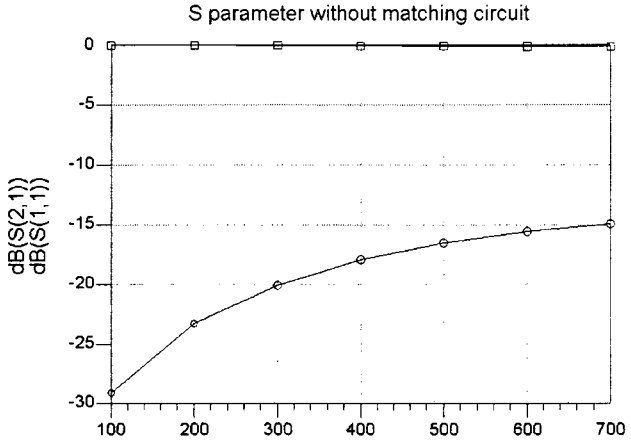

그림 7. 정합회로를 넣지 않았을 때
3차원 모의실험을 통한 S 파라미터 측정

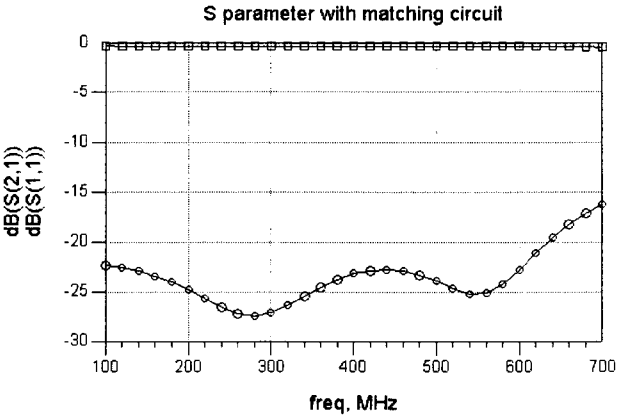

그림 8. 정합회로를 넣었을 때
3차원 모의실험을 통한 S 파라미터 측정

3. 결 론

본 논문에서는 보다 효과적인 부분방전 측정을 위한 임피던스 정합 회로가 첨가된 마이크로스트립 센서를 제안 하였다. 센서의 성능을 개선하기 위해 회전기기내의 구조가 간단하고 작은 크기를 갖는 정합회로를 설계하였고 모의실험을 통해 정합회로를 부착한 센서와 그렇지 않은 센서를 비교 분석하였다. 구부러진 모양의 비대칭 결합 전송선로를 이용한 제안된 정합회로를 통해 보다 광대역의 임피던스 정합 특성을 얻어낼 수 있었고 그 결과 임피던스 부정합

때문에 생기는 반사파로 인한 센서의 성능 악화를 줄이고 센서의 전자파 검출 능력을 향상 시킬 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] H. G. Sedding, R. R. Campbell, G. C. Stone, G. S. Klempner, "A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 6, No. 4, pp.700-706, Dec. 1991

[2] S. M. Tetrault, G. C. Stone, H. G. Sedding, "Monitoring Partial Discharges on 4-kV Motor Windings," *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 35, No. 3, pp.682-688, May/June. 1999.

[3] M. Kurtz, J.F. Lyles, and G.C. Stone, "Application of partial discharge testing to hydrogenerator maintenance," *IEEE Trans. PAS*, Vol. PAS-103, pp. 2148-57, 1984.

[4] D. Pommerenke, R. Jobava, R. Heinrich, "Numerical Simulation of Partial Discharge Propagation in cable Joints Using the Finite Difference Time Domain Method," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 18, No. 6, pp.6-11, 2002.

[5] S. Sakaguchi, and M. Oyama, "Application of Maxwell Solvers to PD Propagation- Part III : PD Propagation in GIS," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 19, No. 1, pp.6-12, 2002.

[6] D. Pommerenke, and S. Sakaguchi, "Application of Maxwell Solvers to PD Propagation Part 1:concept and codes," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, No. 5, pp.15-21, 1998.

[7] E. G. Cristal, "Meander-line and hybrid meander-line trnsformers," *IEEE Trans. On Microw. Theory Tech.*, Vol. 21, No. 2, pp. 69-75, Feb. 1973.

[8] J. Chramiec and M. Kitlinski, "Design of quarter-wave compact impedance transformers using coupled transmission lines," *Electronic Letters*, Vol.38, No. 25, pp. 1683-1685, Dec. 2002.