

AC 및 DC 송전 선로 병렬 연계에 따른 정상상태 커플링 영향 분석

논 문

59-7-6

The Study of Steady-State Interaction Between AC and DC Lines on the Same Transmission Tower

윤 종 수*
(Jong-Su Yoon)

Abstract - The application of the AC and DC lines on the same transmission tower is an economical and practical approaching that increase the power transmission capacity of an existing transmission corridor. But, In this case, Inductive and capacitive coupling between AC and DC lines on the same tower should be investigated in advance. According to the installation plan of 80kV ±60MW bipole HVDC in Cheju, KOREA that will be commissioned until 2011, DC lines will parallelly operate with 154kV 2 AC lines in existed 154kV AC 4 lines transmission tower. This paper presents the steady state analysis results about the interaction between 154kV AC and 80kV DC lines in the same transmission tower.

Key Words : HVDC(High Voltage Direct Current), Electromagnetic Coupling, EMTDC/PSCAD program

1. 서 론

일반적으로 HVDC송전의 경우 기존의 AC 송전에 비해 손실이 적어 장거리 전력전송에 유리하다. 지중 케이블이 아닌 가공 선로로 DC를 송전할 경우, 전용 송전철탑을 건설할 수도 있지만, 송전철탑의 신설이 어려운 경우 기존의 AC 송전철탑에 AC 선로와 병렬로 DC 선로를 추가하여 운용할 수도 있다. 이러한 방법은 경제적인 장점이 있는 반면, AC 전력조류로 인하여 DC 송전선로에 전자계 유도 현상으로 인한 커플링 영향이 발생할 수 있고, 반대로 DC 선로의 사고나 특정조건에서는 DC 선로로 인하여 AC 조류가 영향을 받을 수도 있다. 따라서, AC선로와 DC 선로의 병렬 연계는 사전에 신중히 검토될 필요가 있다. 따라서, 현재까지 이러한 방식을 실제로 운용한 것은 1983년 인도계통에서 200kV AC 선로와 100kV 100MW DC 선로를 병렬 연계 운용한 사례가 대표적인 것으로 알려지고 있다.[1] 한편, 2011년 제주계통 한림풍력 C/S와 한림 S/S사이에 설치될 Bipole 방식의 80kV 60MW HVDC 시스템의 경우, 기존의 154kV AC 4회선 철탑에 DC 선로를 병렬 연계하여 운용할 예정에 있다. DC선로가 설치될 총 길이는 약 9.5km이며 AC선로와 DC 선로의 병렬 연계선로는 8.5km이고 나머지 1km는 지중 케이블로 구성되어 있다. 따라서, 8.5km 가공송전 구간의 154kV 동일철탑내에서 AC 및 DC 선로 병렬 연계에 대한 커플링 영향을 분석할 필요가 있다. 본 논문은 제주계통의 80kV 60MW HVDC 설치 운전에 따른, 동일 철탑내의 AC 및 DC 선로 병렬 연계에 따른 정상상태에서의 AC 및 DC 선로 커플링(Coupling) 영향 분석을 수행한 결과이다. 이러한 분

석을 위하여 전자계파도현상 해석프로그램인 EMTDC/PSCAD를 이용하여 HVDC 시스템과 AC 및 DC 선로 구간을 모델링하고 전자계 영향을 분석하였다. 이때 HVDC 컨버터 및 제어기모델은 CIGRE Benchmark 모델을 기본으로 하였다.

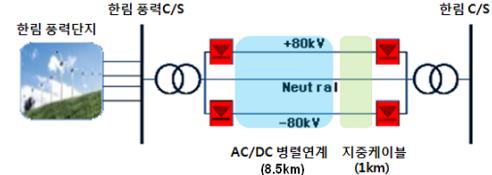


그림 1 80kV 60MW HVDC 송전계통

Fig. 1 80kV 60MW HVDC Configuration

2. HVDC 구성 및 모델링

그림 1은 제주계통에 설치될 80kV ±60MW HVDC 송전계통의 구성도이다. 총 9.5km DC 구간중 기존의 154kV AC 송전철탑을 이용하는 가공 DC선로 구간은 8.5km이며, 나머지 1km는 지중케이블로 연계된다. 그림 2는 AC 및 DC 송전선로(ACSR/AW 330㎟)가 병렬 연계 되는 154kV 4회선 송전철탑의 구조(F4-36형) 및 철탑각부치수를 나타낸다. 기존의 154kV AC 4회선 송전철탑에서 상부의 2회선은 AC 송전선로이고, 하부에 1회선의 +, - DC선로와 중성선(Metallic Return)이 설치될 예정이다. 동일 철탑에서의 가능한 AC 및 DC 선로의 세부 상별 배치는 그림 3과 같다.

80kV ±60MW HVDC 시스템의 경우 직렬로 연계된 6필스 Monopole 2대로 이루어진, 12필스 출력의 Bipole HVDC 시스템으로써 주요 구성내역은 다음과 같다.

- 정류기 및 인버터 : 각 4대

- 변압기 : 154kV/34kV, 36.2MVA/18.1MVA/18.1MVA (Y/Y△), %Z=10%, 정류기 및 인버터 측 각각 2대

* 정회원 : 한전 전력연구원 선임연구원

E-mail : yoonjs@kepri.re.kr

접수일자 : 2010년 6월 3일

최종완료 : 2010년 6월 15일

- Smoothing Reactor : $0.04H \times 2$ 대, Line, Resistor $0.07\Omega \times 2$ 대/Line

그리고 AC 및 DC 송전선로의 구성 및 파라미터는 다음과 같다.

- AC 송전선로 : ACSR/AW 330mm², 9.5km
- DC 송전선로 : LACSR 330mm² 8.5km, 지중케이블 파라미터 : $0.24\mu F$, 1km

AC 및 DC 선로 커플링현상 분석을 위해 사용한 EMTDC/PSCAD 해석모델은 그림 4과 같다. 8.5km의 가공 송전선로의 모델링의 경우, 그림 2와 3의 송전철탑 각부치수 및 상별 배치도를 기반으로 EMTDC/PSCAD Line Tower Universal Model을 사용하여 모델링하였다. HVDC 제어기

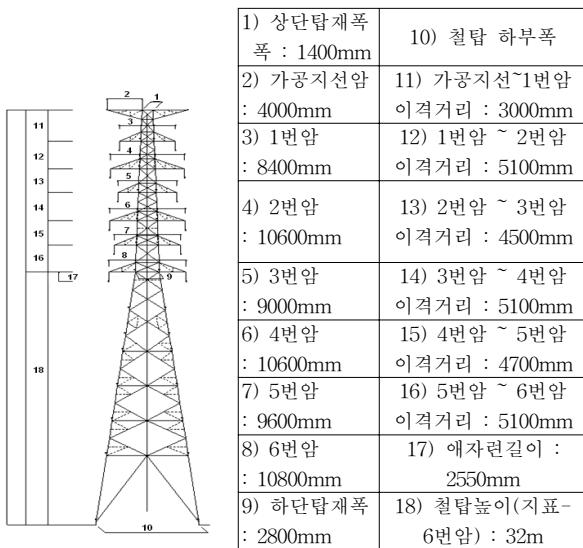


그림 2 AC 및 DC 선로 병렬 연계 송전철탑 구조(F4-36) 및 철탑각부 치수

Fig. 2 Transmission Tower Specification

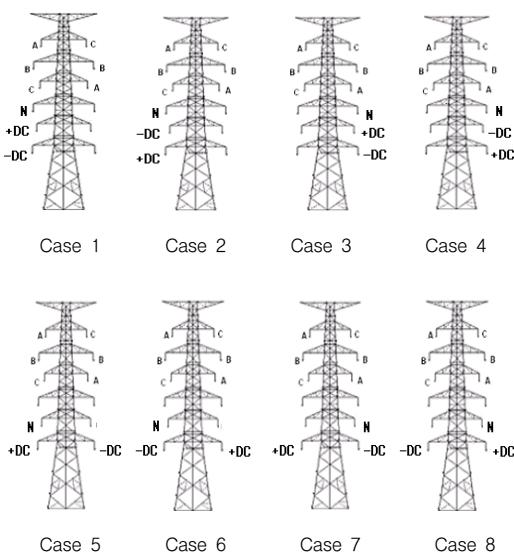


그림 3 AC 및 DC 선로 상별 배치도(Case 1~8)

Fig. 3 AC and DC line arrangement cases(Case 1~8)

의 경우, 본 논문에서는 CIGRE Benchmark 모델에서 사용하는 전압 및 전류제어기를 사용하였다. CIGRE Benchmark 모델에서는 정류기 제어는 정전류 제어를 사용하고, 인버터 제어는 정전류 제어와 γ 제어를 동시에 사용하며, 이를 두 제어값으로부터 최소 점호 위상각 α가 인버터 벨브 제어에 사용된다.[4]

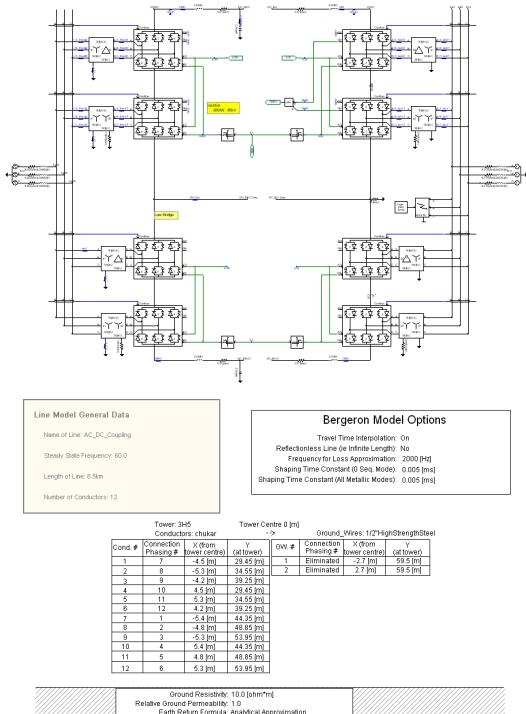


그림 4 EMTDC/PSCAD 해석모델(HVDC 및 송전선로 모델)

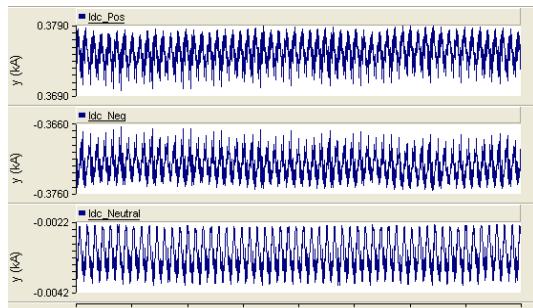
Fig. 4 HVDC & Transmission line EMTDC model

3. 정상상태 AC 및 DC 영향 분석

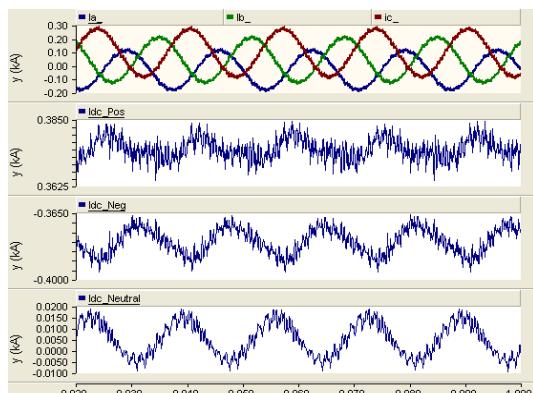
3.1 DC 선로 고조파 영향 분석

그림 3의 배치 가능한 선로배치 구성에 대하여 정상상태, 정격조류제어시 DC 선로에 나타나는 AC 조류의 영향은 다음과 같다. AC 선로가 연계가 없을 경우 HVDC Positive Pole DC선로, Negative Pole DC선로, 중성선(Metallic Return)에 흐르는 DC 전류는 그림 5의 (a)와 같으나, 그림 3의 Case 1의 경우와 같이 AC 선로가 연계되면, DC 전류에는 그림 5의 (b)와 같은 60Hz성분이 나타나게 된다. AC 선로의 배치가 그림 3과 같은 경우 AC 선로의 전류는 그림 5의 (b)의 상단과 같이 나타나게 된다. 이때, AC 전류 크기의 차이는 선로정수 불평형으로 인한 임피던스의 차이에 의해 주로 나타나며, DC 선로에서의 기본파 AC 성분 및 고조파의 구성에도 영향을 미친다.

그림 6은 AC 연계에 따른 ± DC 전류의 주파수 분석내역을 나타낸다. DC 선로만 있을 경우 $12n(n=1,2,3..)$ 차 특성 고조파가 크게 나타나지만, AC 병렬 연계는 주파수 특성에 상당한 변화를 주게 된다.



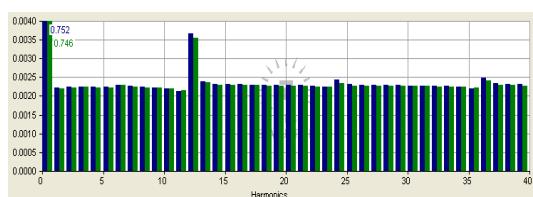
(a) AC 병렬 연계가 없을 경우



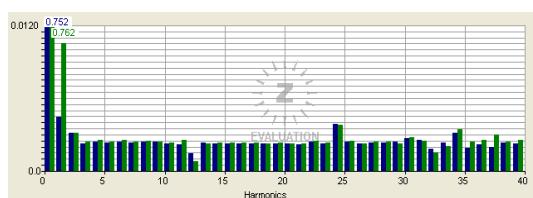
(b) AC 병렬 연계가 있을 경우(선로배열 Case 1)

그림 5 AC 병렬 연계 유무에 따른 DC전류

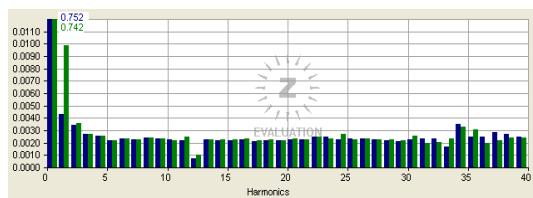
Fig. 5 DC line current without AC pararell line and with AC parallel line



(a) AC 병렬 연계가 없을 경우(Positive & Negative Pole DC 전류)

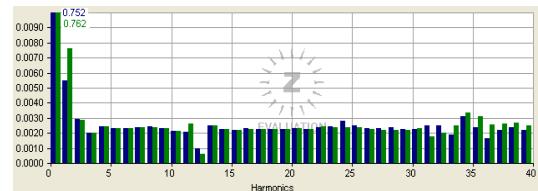


(b) AC 병렬 연계가 있는 경우(Case 1)

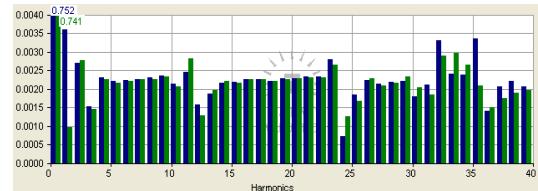


(c) AC 병렬 연계가 있는 경우(Case 2)

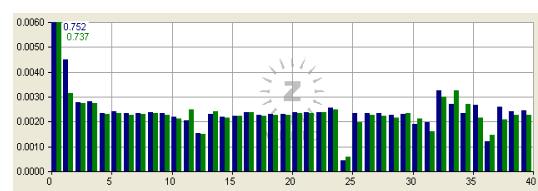
AC 및 DC 송전 선로 병렬 연계에 따른 정상상태 커플링 영향 분석



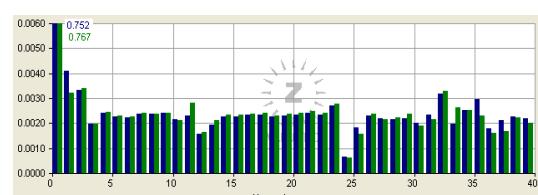
(d) AC 병렬 연계가 있는 경우(Case 3)



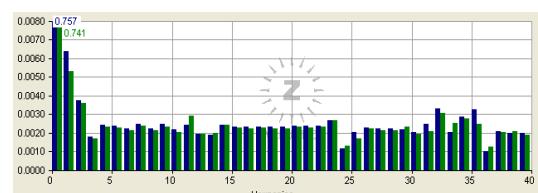
(e) AC 병렬 연계가 있는 경우(Case 4)



(f) AC 병렬 연계가 있는 경우(Case 5)



(g) AC 병렬 연계가 있는 경우(Case 6)



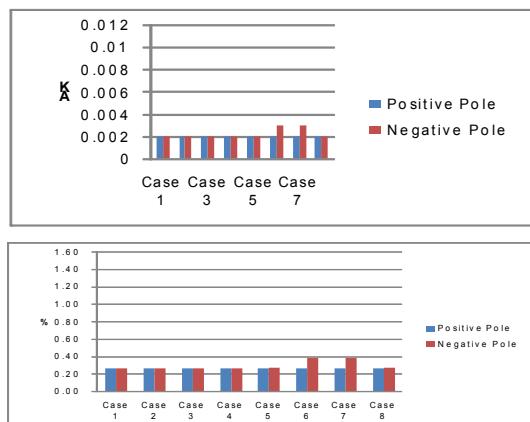
(h) AC 병렬 연계가 있는 경우(Case 8)

그림 6 AC 병렬 연계 유무에 따른 DC전류 주파수 분석

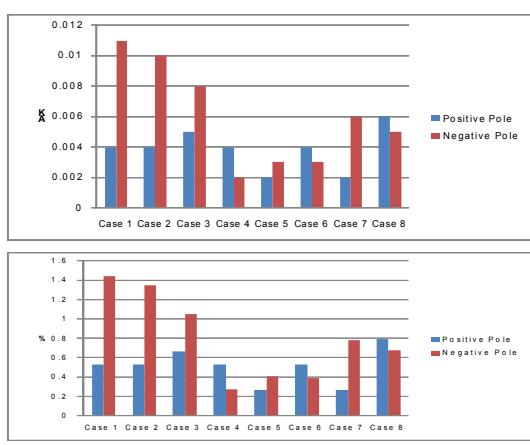
Fig. 6 DC line current spectrum analysis without AC pararell line and with AC parallel line

그림 5 및 그림 6과 같이 AC선로와 DC 선로의 병렬연계를 통한 전자계 커플링으로 인하여 DC 선로에 기본파(60Hz)의 AC 성분이 가장 크게 증가하게 되며, 이러한 현상은 그림 7과 같다. 그림 7은 그림 3의 각 Case에 대한 DC 선로에 나타나는 기본파(60Hz) AC 성분 전류를 분석한 내역으로 기본파 성분의 전류의 크기 및 기본파/DC성분의 백분율을 비교하였다. 전반적으로 AC 선로 병렬 연계로 인하여 기본파 60Hz 전류성분이 DC 선로에 커지고 있으며, 특히 Case 1~3의 경우가 AC 조류로 인하여 60Hz 기본파 성분에 대한 커플링 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타난다. 선로배치 구조로 볼 때 Case 1~4가 나머지 경우보다 AC 선로와 DC

선로가 가까운 경우에 해당하므로 전자계 커플링 영향을 가장 많이 받는다고 볼 수 있다. Case 4와 같이 60Hz 기본파 성분이 Case 1~3에 비해 크지 않는 경우 타 고조파의 크기가 상대적으로 증가하였다. Case 5~8의 경우 AC와 DC 선로가 상대적으로 떨어져 있으므로 AC선로의 영향은 Case 1~4에 비해 상대적으로 감소하는 것으로 분석된다.



(a) AC 선로 병렬연계가 없을경우



(b) AC 선로 병렬연계의 경우

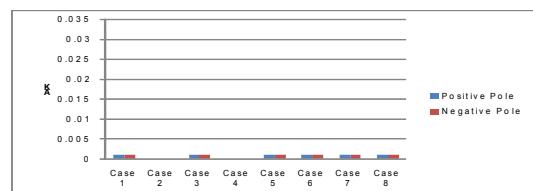
그림 7 DC선로의 DC전류에서의 기본파(60Hz)성분의 크기
(kA, $[I_{60}/I_{dc}] \%$)

Fig. 7 60Hz fundamental AC current component in the DC line(kA, $[I_{60}/I_{dc}] \%$)

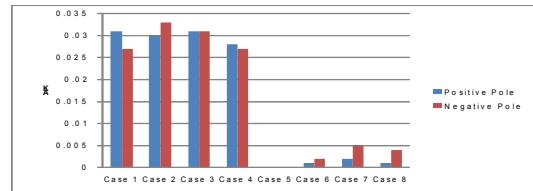
3.2 AC측 DC Offset 영향 분석

AC선로로 인한 DC 전류의 전자계 커플링은 HVDC 컨버터 변압기 AC 전류에 DC Offset을 발생시킬 수 있다. 이와 같은 DC Offset 성분은 변압기에 포화를 일으켜 주기적인 돌입전류를 발생시킬 수 있으며, 많은 접지전류를 발생시켜 통신장애등의 원인이 되기도 한다[5]. 따라서, 그림 3의 각 Case 선로배치에 따른 변압기의 DC Offset 전류에 대한 분석이 필요하다. 그림 8은 AC선로 병렬 연계전후의 각 Case에 대한 정류기측 변압기 AC 전류(1차측)에서의 DC 전류의 크기 및 DC성분/기본파의 백분율을 비교하였다. 예상한 바와 같이 AC 및 DC 선로간의 거리가 상대적으로 가까운 Case 1~4의 경우 변압기에 DC 성분이 많아짐을 알 수 있

고, Case 5~8의 경우는 현저히 감소함을 알 수 있다. 그럼 9는 변압기 Y결선(1차측)의 중성점 접지 전류의 크기를 나타내는데 그림 8의 분석결과와 같이 Case 5~8이 적음을 알 수 있다. 따라서, 3.1의 DC 선로에서의 AC 전류성분의 분석과 컨버터 변압기 AC전류에서의 DC 전류성분 분석 결과 AC 및 DC 선로 병렬 연계를 위해서는 Case 5~8의 구성이 보다 적절함을 알 수 있다. 그림 10은 Case 1의 경우 변압기 1차측 전류를 나타내는데 DC 성분이 많지 않아 DC offset으로 인한 변압기 포화의 발생과 이에 따른 돌입전류 발생은 없는 것으로 분석되며 타 경우도 이와 동일하다.



(a) AC 선로 병렬연계가 없을경우



(b) AC 선로 병렬연계의 경우

그림 8 변압기 AC 전류(1차측)에서의 DC 성분의 크기(kA, $[I_{dc}/I_{60}] \%$)

Fig. 8 DC current in the AC current of the transformer

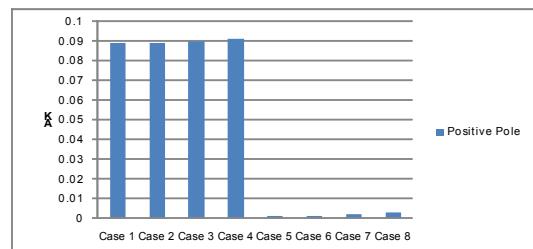


그림 9 컨버터 변압기 중성점 접지전류 크기(kA)

Fig. 9 HVDC transformer neutral ground current

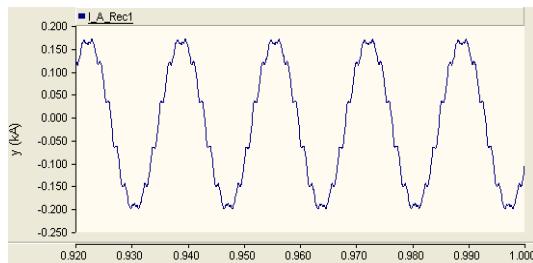


그림 10 컨버터 변압기 1차측 전류(Case1)

Fig. 10 Transformer primary side AC current(Case 1)

3.3 AC 및 DC 선로 연가(Transpose) 영향 분석

이상의 검토결과, AC 및 DC 선로의 병렬 연계는 Case 5~8의 형태가 바람직한 것으로 분석되며, AC에 따른 커플링 영향이 큰 Case 1~4의 경우도, EMTDC에서 제공하는 변압기 포화특성을 적용하여 분석한 결과 DC Offset에 따른 돌입전류등의 영향은 발생하지 않는 것으로 분석된다. 그러나, 이상의 2가지 측면을 고려할 때 Case 1~4보다는 Case 5~8이 바람직하며, 그중에서도 Case 5가 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. DC 선로의 AC 커플링현상의 저감을 위해 E.V. Larsen 등은 참고 문헌 [5]에서 적절한 DC 필터의 적용, DC 제어방식의 고도화, AC 및 DC 선로의 연가 등을 언급한 바 있다. 그림 11은 AC 및 DC 선로에 연가를 적용했을 경우 선로 배치 Case 1에 대한 출력 과정이다. 그림 5와 비교하면 적절한 연가의 활용은 AC 병렬 연계의 문제점을 실제로 해소할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이 경우에도 구체적인 Transpose 방안에 대한 세밀한 검토가 선행되어야 하며, 본 논문에서는 중점적으로 검토하지 않았다.

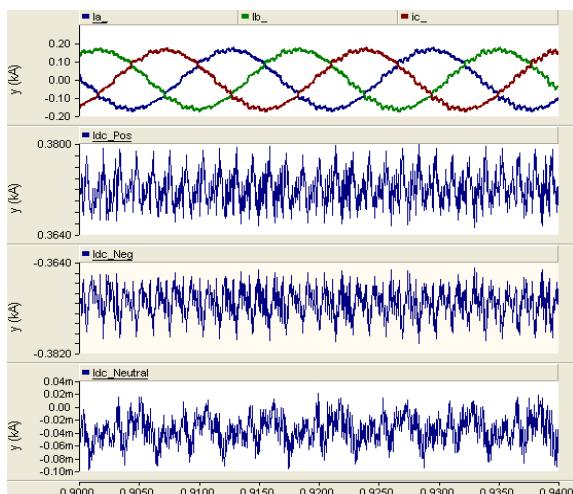
그림 11 AC 병렬 연계 및 연가를 적용시 DC선로 전류
(선로배열 Case 1)

Fig. 11 DC line current with transposed AC lines(Case 1)

4. 결 론

본 논문은 2011년 제주지역에 설치예정인 80kV 60MW Bipole HVDC 시스템의 한립풍력 C/S-한립 S/S간의 DC선로에서의 AC 선로 철탑 병렬 연계에 따른 정상상태 전자계 커플링 현상의 영향을 분석한 내용이다. 154kV AC 4회선 철탑에서 설치가능한 8개의 시나리오에 대하여 DC 선로에 나타나는 AC 성분에 대한 분석과 컨버터 변압기에 나타나는 DC 성분에 대한 분석을 기술하였다. 분석결과 Case 1~4보다는 Case 5~8이 바람직하며, 그중에서도 Case 5가 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 본 분석은 현재 진행중인 80kV 60MW HVDC 시스템 설계 사양을 기반으로 수행되었으며, 향후 설계사양에 수정이 있을 경우 분석 내용에 대한 보완을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] M.I.Khan, R.C.Agrawal, "Conversion of AC line into HVDC", Inaugural IEEE PES 2005 Conference & Exposition in Africa Durban, South Africa, 11-15 July 2005
- [2] M.Kizilcay, A.Agdemir, M.Losing, "Interaction of a HVDC System with 400kV AC systems on the same tower", International Conference on Power System Transient in Kyoto, Japan June 3-6, 2009
- [3] PSCAD/EMTDC Operation Manual
- [4] EPRI, HVDC Handbook
- [5] E.V. Larsen, R.A. Walling, C.J. Bridenbaugh, "Parallel AC/DC Transmission Lines Steady-State Induction Issue", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.4, No.1, January 1989

저 자 소 개



윤종수 (尹鍾秀)

1968년 5월 30일생, 1993년 경북대 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 졸업(석사), 2005년 동 대학원 박사과정수료, 발송전기술사, 1993년~1996년 한전 대구전력관리처 직원, 1996년~현재 한전전력연구원 선임연구원