

3相4線式 多重接地 配電系統 에서의 高抵抗 故障 問題點 (上)

High Impedance Faults on 3 Thase-4 Wire Multi-grounded Distribution Systems.

金 周 鉉

韓國電力(株) 技術研究所 第1研究室長

1. 序 言

配電設備는 發電이나 送變電設備와 달리 직접 需用家에게 電力을 供給하게 되므로 設備의 安全性과 信賴度가 바로 公共社會에 영향을 미치는 밀접한 관계를 가지고 있다.

우리나라의 配電系統은 종래는 3.3kV, 6.6 kV 非接地配電 方式으로서 事故時 通信機器 등의 誘導障害를 저감시키는 效果는 있었으나 配電容量에 限界를 느끼게 되었으며 경제 성장과 더불어 급증하는 需要增加에 대처하고 良質의 電力을 저렴하게 供給하기 위하여 22.9kV-Y 多重接地配電方式을 導入하게 되었다. 그후 22.9 kV-Y 配電設備를 擴充하여 오면서 建設 및 運用上 도출된 諸問題點들을 해결하여 現在 配電系統의 根幹을 이루게 되었으나 당초 豫見하지 못하였던 技業的인 問題點, 例하면 地絡時 保護方式 등은 一部 再檢討 補完이 必要하다는 것을 經驗하게 되었다.

우리 22.9kV-Y 配電系統의 繼電方式은 時間-電流(Time-Current) 파라미터를 기초로 하여 保護하도록 되어 있어서 충분한 故障電流가 흐르지 않는 事故인 경우는 過電流狀態만을 檢出할 수 있는 現保護裝置에 의하여 遮斷分離될

수 없다. 이런 事故를 “高抵抗 故障”이라 한다.

高抵抗故障은 주로 配電線이 斷線되어 大地에 落下되었을 때 大地表面의 導電性이 낮을 경우에 發生된다. 斷線地絡時 자갈이나 눈 또는 얼음으로 뒤덮인 경우 Milliampere 범위를 벗어 나지 못한 故障電流가 發生하고 있다.⁽¹⁾ 더욱 요즘엔 대도시와 같은 인구밀집 지역의 22.9kV-Y 配電線에 架空絶緣 電線을 사용하고 있어서 斷線事故時 대부분 高抵抗 地絡事故로 進전될 可能性이 크므로 現 繼電方式에 의한 保護가 곤란한 現시점에서는 斷線事故 防止에 세심한 주의만이 요구되는 실정이다.

따라서 앞으로 高抵抗 地絡事故가 發生할 主위 여건이 증대됨에 따라 高抵抗故障 特徵과 現 保護繼電 方式의 問題點 및 새로운 保護繼電方式 研究 動向에 關하여 소개하므로써 이에 대비하는 계기가 되고자 한다.

2. 22.9kV-Y 配電系統의 構造와 特徵

우리나라의 3相4線式 配電系統은 線間電壓 22.9kV, 相電壓 13.2kV로 2種電壓을 얻을 수 있다.

中性線은 多重接地하여 그 合成接地抵抗이 5 (Ω /km) 以下를 유지함으로써 電壓線 - 中性線 혼촉사고와 같은 가혹한 고장상태에서도 中性線의 電位上昇을 억제하고 있으며 高低壓 혼촉사고에 대비하여 低壓線과도 共同으로 연결하고 있다.

配電電壓의 크기에 따라 線路의 容量과 保護繼電器의 보호범위가 정해진다. 高抵抗 地絡事故의 경우는 電壓이 높을수록 地絡抵抗의 영향이 상대적으로 감소되어 어느정도 故障電流 檢出이 향상 되겠지만 22.9kV-Y 配電系統에서도 高抵抗故障이 많이 발생되고 있다.

22.9kV-Y 配電系統은 보통 Feeder 當 10,000 kVA정도의 大容量으로 負荷供給 범위가 넓은 長距離線路가 되어 事故發生時의 事故區間을 조속히 除去하고 停電범위를 가능한 最少가 되도록 하기 위하여 變電所의 遮斷器를 비롯하여 線路에 설치하는 Recloser, Sectionalizer, Interrupter switch, Fuse link 및 C.O.S의 Fuse에 이르기까지 상호 保護協調를 기하고 있다.

電線은 종래에는 주로 裸電線을 사용하여 왔으나 현재에는 대도시와 같은 인구밀집 지역에서는 대부분 絶緣電線을 사용하고 있는 실정으로 保護側面에서 볼 때는 絶緣電線이 裸電線에 비하여 斷線地絡時 高抵抗 地絡事故가 될 可能性이 크다는 問題點을 內包하고 있어 解決해야 할 과제로 대두되고 있다.

우리나라에서 22.9kV-Y 多重接地 方式을 채택함으로써 一般적으로 다음과 같은 利點을 들 수 있다.

① 配電電壓을 特高壓으로 昇壓함에 따라 線路容量이 증대되어 長距離 配電이 가능하게 되었으며 종래의 配電方式에서 불가피 하였던 低電壓을 해소함으로써 良質의 電力을 저렴하게 供給할 수 있는 획기적인 계기를 마련하게 되었다. 한편 66kV, 22kV級 送電을 위한 變電所를 생략할 수 있게 되어 도심지의 용지 구득난으로부터 해방될 수 있었으며 경제적으로도 기여한 바 크다.

② 中性線을 多重接地함으로써 地絡事故時 健全上의 電位上昇을 억제하여 機器의 絶緣 Level을 낮출 수 있게 됨에 따라 同電壓 非接地系統에 比하여 경제적이다.

③ 配電線의 地絡事故나 高低壓 혼촉사고 保護는 非接地方式의 경우는 零相電壓과 미소한 零相電流를 檢出하여 保護하였으나 多重接地 配電方式에서는 큰 故障電流를 얻을 수 있으므로 이를 利用한 過電流保護 繼電方式을 채택하고 또한 線路에 Recloser와 같은 保護裝置들을 부설하여 상호 협조시키므로 事故區間을 最少로 축소 遮斷할 수 있는 利點이 있다. 그러나 여기서 다루려고 하는 高抵抗 故障 경우는 두 가지 繼電方式 모두 保護할 수 없는 問題點이 되나 그 정도가 多重接地쪽이 더 큰 것으로 생각된다.

反面 이 配電方式의 短點은 事故時 인근 通信線의 誘導障碍과 低壓線과 共同接地된 中性線의 電位上昇을 들 수 있다. 인근 通信線에 악영향을 미치는 誘導障碍은 大地로 歸路하는 電流에 의한 電磁誘導가 주 원인이 되고 있다. 이 誘導障碍의 정도는 配電線路의 구성 형태나 通信方式 및 大地의 導電率等에 따라 定해지며 大地歸路電流의 크기는 事故形態에 따라 크게 좌우된다. 中性線과의 혼촉事故의 예를 들면 中性線 多重接地抵抗이 낮은치를 유지할 때 비교적 많은 電流가 大地로 歸路하게 되어 誘導障碍가 심해지는 반면에 中性線 電位上昇은 낮아진다. 즉 中性線의 接地抵抗은 電磁誘導 障害와 電位上昇에 서로 相反되는 相關성을 갖고 있음을 알 수 있다. 이러한 電磁誘導障害 軽減대책으로는 大地로 歸路하는 故障電流를 中性線으로 흡수하는 方法과 通信方式이 개선되므로써 그 영향을 줄일 수 있다.

또한 中性線의 電位上昇이 低壓 需用家에 직접 가해질 가능성에 대하여는 漏電遮斷器가 다소 도움이 될 것으로 생각된다.

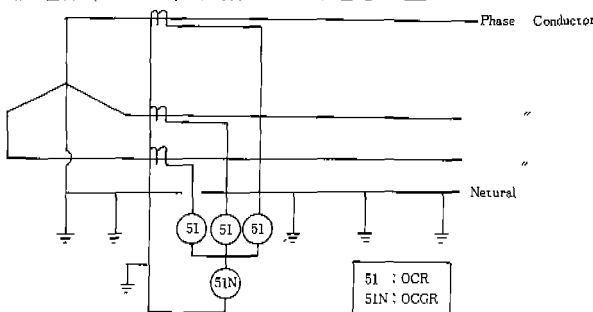
特高壓 多重接地 配電方式을 채택한 이래로 발생한 配電系統의 事故原因을 分析하여 보면 資材의 不良으로 인한 사고가 큰 비중을 차지하고 있다. 이 配電方式 導入당시 資材는 대부분

外資를 사용하였으나 國產化開發 政策에 따라 開發이 推進되는 과정에서 제조업체의 零細性과 技術의 落後性 및 資材의 性能을 判定하는 試驗設備 미비 등 복합적인 여건에서 오는 優秀하지 못한 國產資材는 많은 配電事故를 유발한 것으로 분석된다. 그중에서 特高壓Pin 碼子의 경우 1980年度 配電系統 全体 事故의 21%를 점유하고 있어서 심각한 문제를 던져주고 있다. 이 特高壓Pin 碼子 不良으로 因한 대부분의 事故는 초기 일종의 高抵抗 故障으로 진전되어 미소한 漏洩電流가 흐르는(故障檢出 不能) 상태로 長時間 지속되다가 기후의 변화 혹은 線路에 異常電壓 發生時 機械的 電氣的 破壞에 이르게 되어 保護繼電器를 動作시키게 되는 類型이 많은 것으로 推測된다(특히 碼子部分과 Pin 과의 接着力 不足으로 經年에 의하여 機械的 特性이 현저히 감소하므로 상호 이탈이 되는 현상이 많은 것으로 판단됨). 따라서 故障 初期에는 故障箇所 발견이 불가하므로 일선 配電實務者들의 良質의 電力供給을 위한 維持補修에 많은 어려움을 던져주고 있는 실정이다.

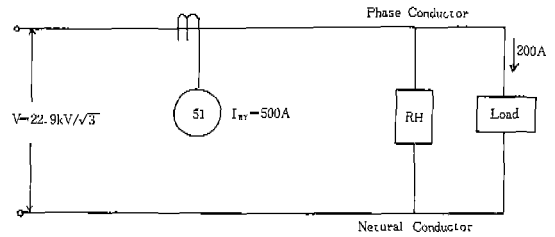
3. 現 22.9kV-Y 配電系統의 保護繼電方式과 故障抵抗

우리나라 3相4線式 配電系統에 적용하고 있는 保護繼電方式은 그림- 1과 같다.

각 相別로 過電流 現象을 檢出하는 過電流繼電器(OCR)와 地絡事故等으로 인한 不平衡分過電流 現象을 檢出하기 위한 過電流 地絡保護繼電器(OCGR)가 있어서 사실상 2重으로 保護



(그림- 1) 多重接地 配電系統의 保護繼電方式



(그림- 2) 負荷電流를 考慮한 保護可能 最大故障抵抗

하고 있는 셈이 된다. 不平衡分電流는 바로 主變壓器의 中性點에 흐르는 電流에 해당되는데 이는 각 相別負荷電流의 不平衡에 의해서도 발생되고 中性線과의 混触事故 혹은 大地地絡 事故에 의해서도 발생되므로 電流단으로는 不平衡 負荷電流와 故障電流의 구분이 불가능하다. 따라서 故障電流가 큰 경우(故障抵抗은 적음)만 을 保護對象으로 하여 OCR는 負荷電流보다 높은 過電流를 檢出하고 OCGR는 예상되는 不平衡負荷電流보다 높은 值에서 檢出되도록 整定하고 있어서 高抵抗故障의 경우는 故障電流가 적어서 保護될 수 없다.

예로 그림- 2와 같이 22.9kV-Y 線路에서 負荷電流가 200A이고 OCR가 500A에서 動作하도록 整定되었다고 가정하면 中性線간에 故障이 발생했을 때 保護可能한 故障抵抗 R_H 는

$$R_H = \frac{V}{I_{PY} - I_{LOAD}} = \frac{22,900 / \sqrt{3}}{500 - 200} \approx 44(\Omega) \dots (1)$$

로 계산되어 44Ω이하가 되는 낮은 故障抵抗일 때만 보호될 수 있음을 알 수 있다.

架空 絕緣電線을 사용한 配電線路에서는 雷害로 인하여 絕緣이 파괴되고 아아크가 발생되어 電線을 지지하는 애자 부근에서 쉽게 溶斷되는 것으로 발표되고 있다.⁽²⁾

絕緣電線의 溶斷狀態는 芯線이 絕緣被覆 속에서 斷線되므로 充電부분이 노출되지 않은 사례가 많다. 실사 지상에 낙하하여 先端이 지면에 접촉되었다 하더라도 접촉면적이 적어서 地絡抵抗은 큰 값이 된다. 습한 지면이라 할지라도 아아크 抵抗이나 大地表面이 순간 가열되어 높은 地絡抵抗으로 변화될 때는 현재의 過電流保護장치로는 보호가 곤란하다.

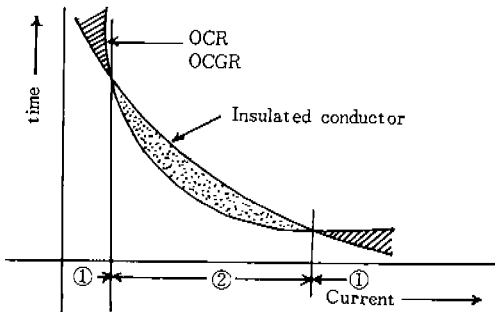
한편 絶緣電線이 용단될 때 수반되는 過電流 現象에 의한 保護繼電器의 동작과 保護協調 關係를 살펴보면 대부분의 過電流繼電器(OCR)와 過電流 地絡保護 繼電器(OCGR)는 反限時形이므로 絶緣電線의 溶斷特性和 비교하면 그림-3과 같다.

故障電流로 구분되는 영역①에서는 OCR이 동작되기 전에 絶緣電線이 溶斷되어 落下하게 될 것이므로 過電流 狀態에서 地絡狀態(高抵抗 地絡)로 급격히 변화하게 됨에 따라 繼電器는 동작상태에 이르지 못하고 원상태로 복귀하게 된다. 영역②에서는 電線이 溶斷되기 전에 OCR이 동작되어 일부 素線이 斷線된 狀態로 남게 될 것이므로 負荷電流에 의한 溶斷事故나 張力에 의한 斷電事故(특히 추운겨울) 위험이 常存하게 된다.

絶緣電線이 溶斷됨과 동시에 保護繼電器가 동작하여 遮斷되는 것이 바람직하겠으나 理論的으로는 그 폭선이 접치는 곳을 제외한 모든 영역에서 保護協調가 되지 않음을 알 수 있다.

따라서 架空配電線이 絶緣化됨에 따라 高抵抗 故障保護가 더욱 심각한 문제점으로 부상되고 있어 실용할 수 있는 高抵抗故障 保護繼電器개발이 시급히 요청된다. 다만 高抵抗故障 保護가 불가능한 현시점에서는 용단사고를 방지할 수 있는 선로의 異狀電壓 해소 대책과 斷線된 電線의 낙하방지를 위한 기계적 보강 방법에 세심한 주의가 필요하다.

다음으로 高抵抗 故障의 特徵을 故障 電流와 故障 抵抗을 중심으로 살펴본다.



〈그림-3〉 過電流 繼電器 動作特性和 絶緣電線의 溶斷特性

配電系統에서 中性線간의 混触 혹은 大地地絡 事故가 발생했을 때 故障電流 I_p 는

$$I_p = \frac{3 E_1}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3 (Z_p + Z_g + R_g)} [A] \cdot (1)$$

로 計算된다.

여기서

E_1 = 變電所 主變壓器의 2次側 故障前 電壓 [V]

Z_0 = 主變壓器에서 본 電源等價 零相 임피던스 [Ω]

Z_1 = 主變壓器에서 본 電源等價 正相 임피던스 [Ω]

Z_2 = 主變壓器에서 본 電源等價 逆相 임피던스 [Ω]

Z_p, Z_g = 相互 임피던스를 포함한 配電線路 및 歸路 임피던스 [Ω]

R_g = 故障抵抗

正相分과 逆相分 임피던스를 같은 値로 적용하고 變電所의 配電用 主變壓器의 結線이 일반적으로 $\Delta-Y$ 이므로 이를 적용하면

$$Z_1 = Z_2 = Z_s + Z_T$$

$$Z_0 = Z_T$$

가 된다.

여기서

Z_s = 主變壓器 1次側에서 본 電源側等價 正相(逆相) 임피던스

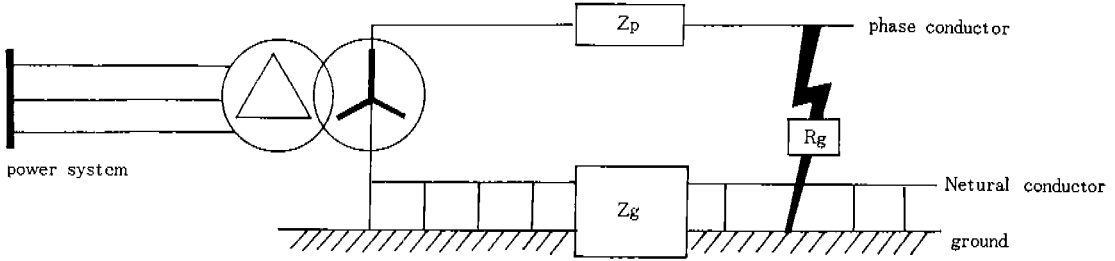
Z_T = 主變壓器 임피던스

따라서 式(1)은

$$I_p = \frac{3 E_1}{2 Z_s + 3 Z_T + 3 (Z_p + Z_g + R_g)} \dots\dots\dots(2)$$

로 된다.

故障電流의 歸路 임피던스 Z_g 는 故障狀態에 따라 다르게 된다. 즉 中性線과 混触 事故時는 故障電流가 中性線을 따라 흐르게 되므로 故障電流의 크기는 中性線接地 抵抗의 영향을 거의 받지 않으나 電位 上昇은 영향을 받는다.⁽³⁾ 반면에 大地에 地絡된 경우는 故障電流가 大地와 中性線의 接地抵抗을 통하여 흐르게 되므로 接地 抵抗의 영향을 크게 받으며 地絡點의 故障抵抗이 일반적으로 높게 되어 保護繼電器를 동작시



〈그림-4〉 多重接地 配電系統의 故障計算을 위한 等價回路

키지 못하는 高抵抗 事故가 되기 쉽다. 그러나 中性線의 多重接地의 合成抵抗은 상당히 낮은 값이 되므로 故障點의 抵抗 R_g 가 電流의 크기를 制限하는 主要因이 되고 있다.

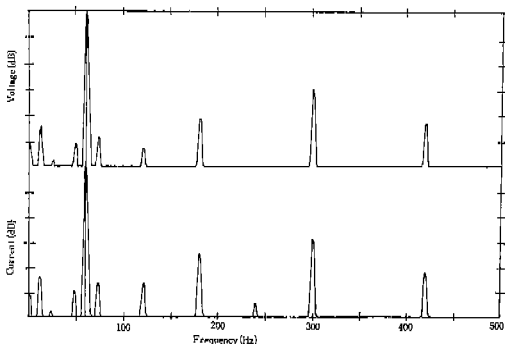
따라서 R_g 가 큰값일 때는 앞에서 설명한 바와 같이 變電所 主變壓器 中性點에 흐르는 電流(空相電流) 크기가 負荷의 不平衡電流 범주를 벗어나지 못하므로 保護되지 않으나 그때의 電流와 電壓의 高調波含有 特性을 波形 分析하면 그림-5, 6에 例示한 바와 같이 故障前後의 周波數 스펙트럼差가 나타난다. 故障電流 및 電壓에 高調波分이 폭넓게 많이 포함하게 되는 것은 事故時 아아크가 수반되기 때문이다. 이러한 아아크의 영향에 높은 配電電壓일수록 故障電流가 상대적으로 커지게 된다. 따라서 故障抵抗 特性은 아아크의 영향이 포함되므로 配電電壓의 크기와 線路의 구성 형태에 따라 다르게 된다. 우리나라 22.9kV-Y 配電系統의 故障抵抗에 관하여 아직 조사된 통계가 없을 뿐더러 시험 연구한 실적도 없어서 우리와 같은 多

重接地 配電方式을 채택하고 있는 미국의 Pennsylvania Power and Light Company(이하 P P & L로表記함) 전력회사에서 12kV로 시험한 故障抵抗 特性을 소개한다. PP & L에서는 裸電線과 絕緣電線을 여러가지 형태의 地表面에 地絡시켜 典型的인 故障電流의 크기와 時間的 變化 特性을 규명하고 적절한 保護繼電 方式을 연구하기 위하여 소위 “East Allentown Test”(66/12kV East Allen-town 變電所에서 實施)를 시행한 결과

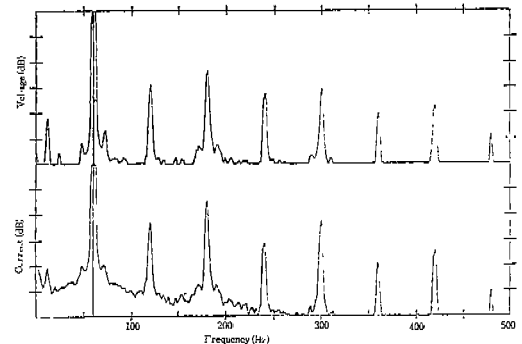
1) 裸電線이 地絡되어도 大地抵抗, 故障抵抗 線路임피던스의 조건에 따라 保護繼電器를 동작시킬만한 故障電流가 흐르지 않는다. 전조된 아스팔트 표면地絡인 경우는 전혀 故障電流가 흐르지 않았다.

2) 동일한 大地表面 조건에서 絕緣電線은 裸電線에 비하여 故障電流가 0~25% 정도 밖에 흐르지 않는데 이는 微少充電部分(導體)이 노출되어 아아크가 발생되기 때문이다.

3) 裸電線의 故障電流 크기는 定常值에 達하



〈그림-5〉 故障前 電壓과 電流의 周波數 스펙트럼 (負荷電流 9 A)



〈그림-6〉 故障狀態의 電壓과 電流 周波數 스펙트럼 (故障電流 1.5A)

고 再現性이 있으나 절연전선 경우는 故障電流 크기가 불규칙적이고 零과 어떤 最大值 사이에서 심하게 변한다. 동일한 故障狀態를 반복했을 때 전혀 再現性이 없이 故障이 아닌 狀態와 같은 결과가 되기도 한다.

이 실험결과로는 흙이나 풀밭에 地絡됐을 때 어느정도 信賴性을 갖고 保護하기 위한 地絡保護繼電器의 整定이 50A이하에서 檢出하도록 해야 하는 것으로 나타났으나 負荷電流와 負荷不平衡電流를 감안할 때 적용 불가능한 것이다. 또한 絶緣電線은 습한 모래위에 地絡됐을 때도 故障檢出이 되지 않을 뿐더러 건조한 아스팔트에 裸電線이 地絡되어도 故障電流가 흐르지 않았다.

〈表-1〉 PP & L의 高抵抗 故障 實態(1974. 4 ~1975. 12)

항 목	총 수	점 유 율[%]	
		나전선	절연전선
공 장	31,000mile	95	5
고저항고장 발생 건수	390 건	83.5	16.5
차단 실패	123 건	62	38

또한 PP & L에서는 1974年 4月부터 1975年12月 사이에 高抵抗故障 390件이 발생되었는데 이를 保護裝置의 動作狀態와 裸電線 및 絶緣電線의 占有率을 分析하면 表-1과 같다.

여기서 알 수 있는 바와 같이 單位 亘長當 高抵抗 故障發生率이 絶緣電線의 경우가 裸電線의 경우보다 3.8倍로 월등히 높다. 미국에서 11.5~13.8kV 3相 4線式 多重接地 配電方式을 채택하고 있는 대부분의 電力會社들도 高抵抗故障을 경험하고 있으며 많은 어려움을 겪고 있는 것으로 나타났다.

〈다음호에 계속〉

參 考 文 獻

1. J. R. Stewart, "Detecting High Impedance Faults" Transmission & Distribution, PP 48~51, 1979. 12
2. "配電用絶緣電線의 아크溶斷特性と 溶斷機構について (その2)" 電力中央研究附, 昭和51年 11月
3. 李光遇, 任化永, 丘成完, "絶緣電線 使用에 관한 研究", 韓電研究所報 14號, PP 64~88, 1980. 8

〈15p에서 계속〉

農半牧의 人口와 「沙漠의 百姓」이라고 불리는 「베도원」이 살고 있다.

이집트는 5000年이 넘는 悠久한 歷史를 자랑하는 古代 人類史를 이어가는 나라이다. 메소포타미아와 印度의 古代文明은 그 대부분이 消滅하여 痕迹을 남기고 있지 않은데 反해 이집트는 燦爛했던 古代文明의 遺迹이 半쯤 모래속에 파묻혀 있기는하나 지금까지도 存在하고 있다.

飛行機에서 내려다 보이는 넓고 넓은 廣漠한 沙漠끝에 突然이 나타나는 한줄기의 푸른 골짜기가 바로 優雅하게 흐르고 있는 이집트의 젓줄 나일江이었다. 나일江의 델타 三角洲에 자리잡은 人口 800萬의 首都 카이로는 新舊의 建物이 不可思議할 程度로 잘 調和하고 있으며 市街의 中心을 나일江이 貫通하고 있다. 카이로의 近代都市는 西紀970年에 일어난 화티마(FATIMA) 朝에 依해 建設되어 오늘에 이르고 있다.

이집트의 代名詞처럼 불리는 有名한 記자의 피라밋(GIZA PYRAMID)과 이를 지키고 있는 人面獅身像의 스피ং크스는 이야기로 들어 보았지만 現地를 直接 보는 感想을 한마디로 表現한다면 이를 建設한 世王 게옵스(CHEOPS), 게후펜(CHEFREN), 미케리노스(MYKERINOS)를 直接 拜謁하며 그 時代에 거슬러 올라가 살고있는 느낌이였다. 또 古代 이집트 第3王朝의 ZOSAR王이 紀元前2186年에 建設한 人類史上 가장 오래된 石造建物 삭가라·피라밋(SAKKARA PYRAMID)을 바라보는 心情은 時間空間을 超越한 高次元의 世界로 날아 들어가는 氣分이였다.

이외에 古代 이집트 歷史를 엮어가며 紙上觀光을 案内할 話題가 무궁무진 하지만 紙面關係로 여기서 擱筆하겠다.